

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.
Корндорф С.Ф. 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>Витковский И.В., Долгов Н.А., Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С., Якушина С.И.</i> Модель разрушения тонкопленочных покрытий на деформируемой основе.....	3
<i>Гаврилина В.А., Сычев С.Н.</i> Перспективы применения комбинированного метода «высокоэффективная жидкостная хроматография – метод главных компонент» в хемосистематике растений.....	11

Моделирование технологических процессов

<i>Степанов Ю.С., Кобяков Е.Т., Поляков А.И.</i> К вопросу определения законов изменения динамических параметров шлифовального блока с наклонным абразивным инструментом.....	16
<i>Алтухов Ю.А., Кисляк С.М., Аль Замли Али Мирали Джасим</i> Численное моделирование турбулентного течения в разных типах золоуловителей.....	27

Конструирование, расчеты, материалы

<i>Адигамов К.А., Черненко Г.В., Зеленищikov А.В.</i> Энергоемкость транспортирования материалов вертикальным шнековым конвейером.....	36
<i>Фокин Ю.И., Розалев В.В.</i> Материалы с эффектом памяти формы в двигателестроении.....	40
<i>Фокин А.Ю.</i> Применение гипотезы о законе прогрессивной конструктивной эволюции технических объектов для изучения конструктивной эволюции поршневых ДВС.....	48
<i>Петров Н.В., Злобин С.Н.</i> Экспериментальные исследования процессов в кривошипном прессе с гидродемпфером при разделительных операциях.....	58

Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Бабичев А.П., Коваль Н.С.</i> Технологические испытания опытной конструкции многоместного приспособления для виброударной упрочняющей обработки длиномерных деталей.....	63
<i>Волков Д.П., Ямников А.С.</i> Технологические аспекты изготовления и контроля винтовых пуансонов.....	66
<i>Осипов А.П.</i> Угол сдвига и его влияние на стружкообразование при шлифовании.....	73
<i>Гуров Р.В.</i> Определение влияния упругих деформаций при ОУО ППД на усилие обработки и формирование шероховатости.....	80
<i>Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А., Поляков А.В., Волобуев А.В.</i> Особенности формирования упрочненного поверхностного слоя отверстий статико-импульсной обработкой.....	84
<i>Корнева М.И., Протасьев В.Б.</i> Задачи оптимизации процесса отделочной обработки деталей из латуни комбинированным фасонным режуще-деформирующим инструментом.....	90
<i>Стеблецов Ю.Н., Тарапанов А.С., Михайлов Г.А.</i> Экспериментальное исследование сил резания при обработке зубчатых колес передачи Новикова.....	95
<i>Кухарь В.Д., Селедкин С.Е., Киреева А.Е.</i> Кинематика течения металла при осадке тонколистовых прямоугольных заготовок.....	102

Инновации и кадры в машиностроении

<i>Савин Л.А., Поляков Р.Н.</i> Вопросы оснащения учебных лабораторий общинженерной подготовки.....	106
<i>Морозова А.В.</i> Формализация информационных пространств квалиметрической модели оценивания уровня сформированности компетенций специалистов машиностроительного профиля.....	112

Приборостроение и биотехнические системы

<i>Иванов Б.Р., Иванов Ю.Б.</i> Повышение чувствительности датчиков автономных цифровых дозиметров.....	118
<i>Косчинский С.Л.</i> К вопросу оптимизации регуляторов тока асинхронного электропривода.....	123
<i>Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А.</i> Сравнительная оценка различных способов скалярного управления тяговым асинхронным двигателем с учетом температуры обмоток.....	129

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Шкатов П.Н., Колосков Д.В.</i> Вихретоковый контроль тепловых канавок роторов паровых турбин.....	136
<i>Корндорф С.Ф., Никулина И.Н.</i> Методика и результаты контроля ползучести экзокарпиев ягод.....	141
<i>Подмастерьев К.В., Подмастерьев А.К., Яковенко М.В.</i> Оценка качества адгезии смазочных материалов на металлических поверхностях.....	146
<i>Пахолкин Е.В., Анцифорова Е.В.</i> Экспериментальные исследования смазочной способности моторных масел электрическим методом.....	153
<i>Коробко А.В., Абашиш Е.Г.</i> Контроль начального модуля упругости бетона в ненапряженных железобетонных балках вибрационным методом.....	160



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

№ 6-2 (290) 2011
November-December

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education
«State University – Education-Science-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
Korndorf S.F. Doc. Sc. Tech., Prof.
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.
Smolenzev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof.

Responsible for edition

Grigorieva O.Yu.

Address

302020, Orel,
Naugorskoe shosse, 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

- Vitkovskij I.V., Dolgov N.A., Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S., Yakushina S.I.* Model of destruction of thin-film coverings on a deformable basis..... 3
Gavrilina V.A., Sy'chuyov S.N. Prospects of application of the combined method «the highly effective liquid chromatography – method of the main components» in a hemostatization of plants..... 11

Process modeling

- Stepanov Yu.S., Kobayakov E.T., Polyakov A.I.* To a question of definition of laws of change of dynamic parameters of the grinding block with the inclined abrasive tool..... 16
Altuxov Yu.A., Kislyak S.M., Al' Zamili Ali Mirali Dzhasim Numerical simulation of turbulent flow in different types of ash removal..... 27

Construction, calculation, material

- Adigamov K.A., Chernenko G.V., Zelenshnikov A.V.* Power consumption of transportation of materials by the vertical screw conveyor..... 36
Fokin Yu.I., Rogalyov V.V. The materials with form memory effect in propulsion engineering..... 40
Fokin A.Yu. Hypothesis application about the law of progressive constructive evolution of technical objects for studying of constructive evolution of piston internal combustion engines..... 48
Petrov N.V., Zlobin S.N. Experimental researches of processes in the crank press with hydro-dampfer by the cutting operations..... 58

Machine building technology and toolware

- Babichev A.P., Koval' N.S.* Technological tests of the skilled design of the many-placed adaptation for vibroimpact hardening treatment of lengthy details..... 63
Volkov D.P., Yamnikov A.S. Technological aspects of manufacturing and quality checking of helical surface punches..... 66
Osipov A.P. The shear angle influence on the chip formation in grinding..... 73
Gurov R.V. Determination of the influence of elastic deformation at finishing and hardening processing of surface plastic deformation of the efforts of processing and forming roughness..... 80
Kirichek A.V., Solov'yov D.L., Silant'ev S.A., Polyakov A.V., Volobuev A.V. Features of formation the hardened surface layer of holes by static-pulse processing..... 84
Korneva M.I., Protas'ev V.B. Optimization problem of finish machining of brass combination shaped cutting-deformable tools..... 90
Steblecov Yu.N., Tarapanov A.S., Mixajlov G.A. Experimental probe of forces of cutting at handling of tooth gears of Novikov transmission..... 95
Kuxar' V.D., Selyodkin S.E., Kireeva A.E. Kinematics of metal flow during the sediment of thin sheet rectangular performs..... 102

Innovation and frame in machine building

- Savin L.A., Polyakov R.N.* Questions of equipment of educational laboratories general-engineer preparations..... 106
Morozova A.V. Formalization of information spaces of qualimetry model for estimating of level of experts the specialists of the machine-building..... 112

Instrument making and biotechnological system

- Ivanov B.R., Ivanov Yu.B.* Detector sensitivity increase of autonomous digital dosimeters..... 118
Koschinskij S.L. To the problem of optimal current controllers synthesis of induction motor drive... 123
Kosmodamianskij A.S., Vorob'yov V.I., Pugachyov A.A. Comparative estimation of different ways of scalar control of the traction induction motor taking into account the temperature of windings..... 129

Tests, control, diagnostics and quality control

- Shkatov P.N., Koloskov D.V.* Eddy current testing thermal flutes of rotors of steam turbines..... 136
Korndorf S.F., Nikulina I.N. Methods and results of control creep skins berries..... 141
Podmaster'ev K.V., Podmaster'ev A.K., Yakovenko M.V. Adhesion quality estimation of liquid lubricant materials on metal surfaces..... 146
Paxolkin E.V., Anciforova E.V. Experimental researches of lubricating ability of engine oils by electric methods..... 153
Korobko A.V., Abashin E.G. Control of concrete elasticity module in reinforced concrete beams by the vibration method..... 160

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 539.3

И.В. ВИТКОВСКИЙ, Н.А. ДОЛГОВ, Л.Ю. ФРОЛЕНКОВА, В.С. ШОРКИН,
С.И. ЯКУШИНА

МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕФОРМИРУЕМОЙ ОСНОВЕ

Предложен метод расчета теоретического и реального пределов прочности линейно упругих хрупких материалов. В основу положена модель градиентного материала, являющаяся следствием теории нелокального парного и тройного потенциального взаимодействия частиц сплошной упругой среды. Расчетные данные сравниваются с известными, представленными в справочной литературе.

Ключевые слова: теоретический и реальный пределы прочности, градиентная теория упругости, парное и тройное взаимодействие частиц сплошной среды, микротрещины, теория Гриффитса.

ВВЕДЕНИЕ

Интересы конструирования и эксплуатации изделий, функциональные элементы которых работают в жестких условиях, требуют создания материалов с заранее заданными механическими свойствами. Одним из таких свойств является предел прочности. В силу необходимости сокращения количества дорогостоящих экспериментов, обоснования программы их проведения возникает необходимость теоретического предсказания этой величины.

Прочность материала определяется прочностью его межатомных связей. Характер взаимодействия атомов определяет и ряд других свойств. Поэтому, несмотря на то что многие из этих свойств в рамках термодинамики и механики сплошных сред определяются в независимых экспериментах, они являются связанными между собой, зависимыми друг от друга. Установление этих зависимостей также актуально в связи с проблемой создания материалов с заданными свойствами. Это можно сделать методами теоретической физики.

Добиться обладания материалами тех или иных заранее заданных, часто противоречивых, свойств возможно за счет различных внешних воздействий на них, изменяющих их структуру, вводя в их состав различные компоненты. Для таких материалов с их сложным химическим составом и структурой использовать методы физики твердого тела часто невозможно. Поэтому возникает необходимость использования для моделирования процессов в материалах со сложным составом и структурой методов механики и термодинамики сплошных сред. В данной работе эти методы применены для установления связи между коэффициентами Ламэ, характеризующими упругие свойства материала, и пределами прочности: теоретическим, при поиске которого игнорируется наличие в материале микротрещин, и реальным, когда наличие микротрещин учтено.

ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Допускается, что под действием растягивающего одноосного усилия (действующего, например, в вертикальном направлении) с поверхностной интенсивностью σ_u , равной по предположению реальному пределу прочности, в нем появляется периодическая сеть трещин, преимущественная ориентация которых перпендикулярна направлению усилия. (Классическая теория разрушения рассматривает в этом случае устойчивость отдельной трещины [1]). Сеть трещин имеет ячеистую периодическую структуру, как в направлении действия растяжения, так и в плоскости их преимущественной ориентации.

В основу этой гипотезы положен тот факт, что реальные материалы имеют периодическую зернистую структуру, а также ряд экспериментальных данных по разрушению тон-

ких металлических пленок, нанесенных на растягиваемую подложку. Их описание представлено в работах [2-7].

На рисунке 1 представлены электронные микрофотографии рельефа поверхности полимерных пленок с тонким покрытием, имеющим модули упругости и сдвига, намного превышающие их значения для полимерной подложки, после их растяжения. Стрелки указывают направления растяжения. Светлые полосы – фрагменты разрушившегося покрытия, темные – трещины в разрушившемся покрытии. Из рисунка 1 следует, что после растяжения покрытие распадается на множество регулярно расположенных островков примерно одинакового размера с формированием регулярного рельефа. Характерна строгая ориентация его элементов относительно оси растяжения.

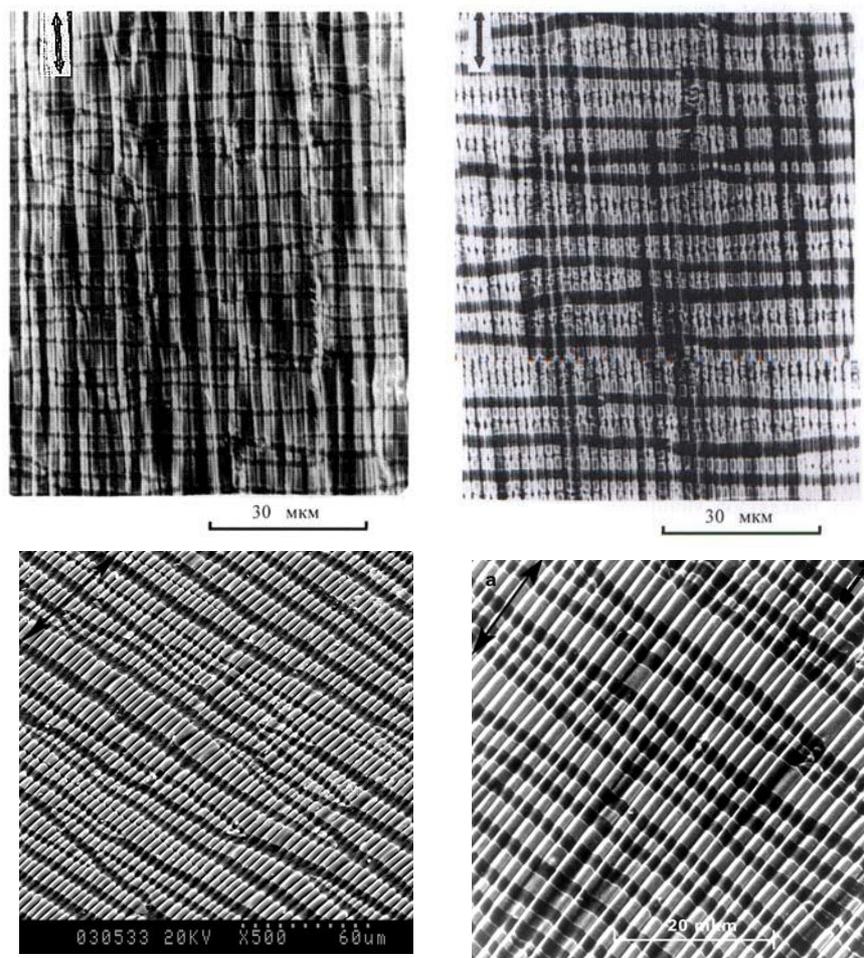


Рисунок 1 – Электронные микрофотографии рельефа поверхности полимерных пленок с тонким покрытием

В работах [2-7] предложен механизм процесса фрагментации покрытия. В случае однородной деформации полимера-подложки процесс фрагментации покрытия можно условно разделить на две стадии. Вначале трещины зарождаются на хаотически расположенных микроскопических дефектах. При этом сами трещины располагаются беспорядочно и делят поверхность на фрагменты разного размера. В каждом отдельно взятом фрагменте напряжение распределено неоднородно, и достигает максимума в его центре.

Когда оно становится равным пределу прочности материала покрытия, фрагмент рвется на две равные части. Механизм деления фрагментов пополам становится доминирующим после того, как все дефекты и слабые места покрытия разрушатся. При этом на поверхности формируется упорядоченная система фрагментов. При дальнейшей вытяжке этот процесс повторяется до тех пор, пока подложка способна передавать покрытию напряжение, превышающее прочность

покрытия. Этот эффект наблюдается независимо от того, связан ли рост напряжения с изменением температуры или скорости вытяжки.

Таким образом, по мере вытяжки происходит переход от беспорядочного разрушения покрытия по дефектам к процессу деления фрагментов пополам, последний, в свою очередь, приводит к формированию упорядоченной структуры на поверхности.

Учитывая изложенный экспериментальный материал, обобщая его на трехмерный случай и упрощая математическое описание процесса, допускается, что каждая ячейка представляет собой куб с ребром l . В левом переднем углу верхней и нижней граней находятся две квадратные трещины, с параллельными граням сторонами длиной l_{cr} . Они моделируются математическими разрезами. Если площадь грани равна l^2 , то площадь трещины равна $l_{cr}^2 = \alpha l^2$, где относительная площадь α , а также l и l_{cr} подлежат определению. Оставшаяся площадь грани составляет величину $(1 - \alpha)l^2$.

Рассматриваемая среда до появления в ней трещин являлась бесконечно протяженной, однородной, линейно упругой. Ее деформированное состояние описывается не одним, а двумя градиентами перемещений. При этом напряженное состояние характеризуется также двумя тензорами, каждый из которых состоит из двух слагаемых: постоянного слагаемого, зависящего от деформации, и слагаемого, зависящего от них. Постоянные составляющие тензоров напряжения и тензоры, характеризующие упругие свойства среды, вычисляются посредством известных потенциалов парного и тройного взаимодействия частиц упругой среды. В данной работе рассматриваем вариант модели, использованный в работе [8, 9] для оценки несплошности (трещиноватости) адгезионного контакта двух тел, состоящих из разных материалов.

Величина α в работе [8, 9] вычисляется для случая, когда вдоль плоскости, на которой появляются описанные выше микротрещины (с той лишь разницей, что в нашем случае l_0 конечно, а в работе [8, 9] $l_0 \rightarrow 0$), контактируют изотропные, однородные, упругие, полубесконечные тела, состоящие из разных материалов, с помощью выражения:

$$\alpha = \left(1 + \frac{W_{\alpha\alpha} - 0,5W_{\alpha(1-\alpha)}}{W_{(1-\alpha)(1-\alpha)} - 0,5W_{\alpha(1-\alpha)}} \right)^{-1}. \quad (1)$$

где W_{km} ($k, m = \alpha, 1 - \alpha$) – значения суммарных (по обоим контактирующим телам) работ внутренних обобщенных сил, развивающихся вблизи участка k на обобщенных перемещениях, развивающихся на соседнем (или совпадающем) с ним участке m , приходящимся на единицу площади области контакта.

В работе [8, 9] установлено, что если материал контактирующих тел одинаков, а внешние воздействия отсутствуют, величина $\alpha = 1$. Но если материалы контактирующих тел разные или на объединенные тела действуют отличные от нуля силы, величина α оказывается менее единицы, но больше нуля. Это свидетельствует о появлении микротрещин ($1 - \alpha \neq 0$). Вместе с тем, обрыва связи между телами нет, так как $\alpha \neq 0, 0 < \alpha < 1$.

Выражение (1) построено по аналогии с построением условия Гриффитса, определяющего значение длины микротрещины, обеспечивающее стационарность функции энергии, равной разности упругой энергии и появившейся поверхностной энергии.

Допускается, что величина α в рассматриваемой ситуации, когда $l_0 = \text{const}$, определяется тем же выражением (1), что та же величина α при условии $l_0 \rightarrow 0$.

Слой материала между двумя параллельными трещинами-разрезами считается аналогом слоя $(1 - \alpha)$ работы [8, 9]. Он ограничен свободной поверхностью, на которой распределена поверхностная энергия с интенсивностью W_p . В этом слое деформации и перемещения частиц, а также напряжения полностью отсутствуют. Деформации материала между параллельными трещинами компенсированы при их раскрытии. Влиянием перемещения краев трещин, возникшего

при их раскрытии, на энергетический баланс пренебрегаем.

Слой материала между плоскостями, в которых расположены трещины, дополняющий слой $(1 - \alpha)$ до полной элементарной ячейки структуры, образовавшейся после появления трещин, считается аналогом слоя α работы [8, 9]. Для него считается, что напряжения в нем после образования трещин и деформации распределены равномерно и имеют классический характер. Их величина равна теоретическому пределу прочности σ_t .

Значение растягивающего напряжения σ_u – это значение, при достижении которого размеры возникшей в материале трещины принимают стационарное, но неустойчивое значение. При этом трещина развилась до этих размеров из дефектов структуры реального материала. В окрестности границ трещины, являющихся концентратором напряжений, при незначительном превышении растягивающих напряжений над σ_u развиваются сложные процессы, проанализированные и количественно оцененные, например, в работах [10]. Считаем, что в слое материала $(1 - \alpha)$ это незначительное превышение напряжений привело к развитию такого напряженного состояния, когда среднее по этому слою напряжение оказалось равным теоретическому пределу прочности, после чего в окрестности границ трещины развились процессы [11], приведшие к разрушению соединяющей две соседние трещины перемычки материала.

Таким образом, первоначально сплошной (по предположению) материал растягивается увеличивающимся напряжением σ до тех пор, пока σ не достигает значения практического предела прочности $\sigma = \sigma_u$, превышение которого приводит к катастрофическому развитию трещин, приводящих к разрушению тела на две части. Но при этом должна разрушиться сплошная часть α ячейки структуры трещин. Следовательно, в этой части в момент появления трещин развивается напряжение $\sigma = \sigma_t$. В результате исходная упругая энергия $\frac{\sigma_u^2}{2E} l^3$ (E – модуль Юнга), соответствующая напряжению $\sigma = \sigma_u$, преобразуется в поверхностную энергию $2(1 - \alpha)W_p l^2$ берегов образовавшейся трещины и упругую энергию $\alpha \frac{\sigma_t^2}{2E} l^3$ сплошной части материала ячейки. С учетом этого можно записать балансовое соотношение

$$\frac{\sigma_u^2}{2E} l^3 = 2(1 - \alpha) l^2 W_p + \alpha \frac{\sigma_t^2}{2E} l^3. \quad (2)$$

При этом оказывается, что

$$W_{(1-\alpha)(1-\alpha)} = 2W_p; \quad W_{\alpha\alpha} = \frac{\sigma_t^2}{2E} l; \quad W_{\alpha(1-\alpha)} = 0. \quad (3)$$

В результате величина α определяется выражением

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_t^2 l}{4W_p E}}. \quad (4)$$

Обозначив

$$\sigma_u = \chi \sigma_t, \quad (5)$$

получаем, что для расчета на основании уравнений (2) и (4) практического предела прочности σ_u конкретного материала необходимо знать величины E , σ_t , W_p , l . Для их определения предлагается использовать модель сплошной упругой среды, основанную на учете нелокального потенциального парного и тройного взаимодействия ее элементарных частиц [12, 13].

Для оценки величины l использовано решение задачи о напряженно-деформированном состоянии плоскости между двумя симметрично расположенными клинообразными вырезами с малым углом раскрытия и осью симметрии, перпендикулярной растягивающему усилию. Задача

решалась в рамках модели градиентной упругой среды методами, использованными в работах [14, 15] для расчета напряженно-деформированного состояния материала в окрестностях концентраторов напряжений. Выбор модели обусловлен тем, что значения компонент тензоров напряжений и градиентов перемещений в бесконечно малой окрестности угловой точки в ее рамках являются конечными, зависящими от величины внешнего воздействия (например [11, 14]). Величина l определялась по результату расчета растягивающего напряжения на линии, соединяющей вершины вырезов из условия равенства среднего вдоль этой линии напряжения величине σ_t . Оказалось, что справедлива оценка: $l \approx l_0 \cdot 10^3$.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С ИЗВЕСТНЫМИ ДАННЫМИ

Результаты расчета поверхностной энергии W_p , теоретического σ_t и реального σ_u пределов прочности представлены в таблице. Там же для сравнения представлены значения тех же величин, взятые из справочной литературы.

Таблица 1 – Сравнение расчетных и известных значений поверхностной энергии, теоретического и реального пределов прочности

Материал	$\sigma_t, 10^{10}$ Па	$\sigma_t, 10^{10}$ Па, [16, 17]	$\sigma_u, 10^{10}$ Па	$\sigma_u, 10^{10}$ Па, [16]	$l_{cr}, 10^{-7}$, м	$\alpha, 10^{-5}$
Al	0,98	0,90	0,069	0,05	4,05	4,9
Cr	4,47	3,08	0,13	0,41	2,88	0,8
Ti	1,56	2,05	0,11	0,24	3,31	4,9
Mo	4,05	3,91	0,23	0,80	3,15	3,1
V	2,83	3,41	0,11	0,22	3,03	1,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модель разрушения упругого материала, опирающаяся на наблюдаемую в экспериментах схему разрушения тонкопленочных покрытий основы с меньшим, чем у покрытия значением модуля упругости. Расчеты теоретического предела прочности, реального предела прочности (разрушающего напряжения) и поврежденности материала дают удовлетворительное соответствие с известными из справочной литературы данными. Модель может быть использована для расчета предельно допустимых напряжений, развивающихся в тонкопленочных покрытиях при деформации основы, на которую они нанесены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работнов, Ю.Н. Введение в механику разрушения [Текст] / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
2. Новый подход к оценке механических свойств твердых тел экстремально малых и экстремально больших размеров [Текст] / А.Л. Волинский [и др.] // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). – 2006. – Т. L. – № 5. – С. 126-133.
3. Волинский, А.Л. Структурная самоорганизация аморфных полимеров [Текст] / А.Л. Волинский, Н.Ф. Бакеев. – М.: Физматлит, 2005. – 230 с.
4. Volinskii, A.L. Multiple Cracking of rigid platinum film covering polymer substrate [Text] / A.L. Volinskii, S.L. Bazhenov, O.V. Lebedeva, A.N. Ozerin, N.F. Bakeev // Journal of Applied Polymer Science. – 1999. – V. 72. – P. 1267-1275.
5. Nolte, A.J. Determining the Young's Modulus of Polyelectrolyte Multilayer Films via Stress-Induced Mechanical Buckling Instabilities [Text] / A. J. Nolte, M. F. Rubner, R. E. Cohen // Macromolecules. – 2005. – V. 38. – P. 5367-5370.
6. Vendamme, R. Synthesis and Micromechanical Properties of Flexible, Self-Supporting Polymer-SiO₂ Nanofilms [Text] / R. Vendamme, T. Ohzono, A. Nakao, M. Shimomura, T. Kunitake // Langmuir. – 2007. – V. 23. – P. 2792-2799.
7. Долгов, М. Сингулярність напружень при створенні та руйнуванні вакуумно-дугових покриттів [Текст] / М. Долгов, І. Смирнов // Вісник ТНТУ. Серія Механіка та матеріалознавство. – 2011. – Т. 17. – № 2. – С.52-58.
8. Витковский, И.В. Теоретическая оценка несплошности адгезионного контакта элементов жидкоме-

- таллического бланкета термоядерного реактора [Текст] / И.В. Витковский, А.Н. Конев, С.И. Якушина, В.С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – В. 6. – С. 28-33.
9. Фроленкова, Л.Ю. Теоретическая оценка величины практического предела прочности [Текст] / Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин, С.И. Якушина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 3. – С. 3-7.
10. Гуткин, М.Ю. Дефекты и механизмы пластичности в наноструктурных и некристаллических материалах [Текст] / М.Ю. Гуткин, И.А. Овидько. – СПб.: Янус, 2001. – 178 с.
11. Arnan, R. The Nonlocal Solution of the Elastic Half-Plane Loaded at the Origin by Shear Force [Text] / R. Arnan // Turk J Engin Environ Sci. – 2001. – V. 25. – P. 391-403.
12. Шоркин, В.С. Модель сплошной упругой среды, основанная на представлении о дальнедействующем потенциальном взаимодействии ее частиц [Текст] / В.С. Шоркин; под ред. И.А. Кийко, Р.А. Васина, Г.Л. Бровко // Упругость и неупругость. – М.: Ленанд, 2006. – С. 271-282.
13. Шоркин, В.С. Учет влияния тройного взаимодействия частиц среды на поверхностные и адгезионные свойства твердых тел [Текст] // В.С. Шоркин, Л.Ю. Фроленкова, А.С. Азаров // Материаловедение. – 2011. – № 2. – С. 2-7.
14. Деренговский, А.Г. Конечность напряжений в окрестности вершины плоского клина [Текст] / А.Г. Деренговский, Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин // «Механики – XXI веку»: материалы IX Всероссийской международной научно-технической конференции. Братск, 12-14 мая 2010 г., Братский ГУ. – С. 25-29.
15. Деренговский, А.Г. Результаты расчета напряжений в вершине острой режущей кромки [Текст] / А.Г. Деренговский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 12. – С. 54-56.
16. Свойства элементов. Физические свойства: Справочник [Текст] / Е.Б. Самсонов. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
17. Петч, Н. Металлографические аспекты разрушения [Текст] / Н. Петч // Разрушение. Т. 1. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. – М.: Мир, 1973. – С. 376-420.

Витковский Иван Викторович

Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург
 Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
 Тел. (812) 464-89-63
 E-mail: vitkoviv@sintez.niiefa.spb.su

Долгов Николай Анатольевич

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко Национальной академии наук Украины, г. Киев
 Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
 Тел. (044) 286-69-57
 E-mail: donika@inbox.ru

Фроленкова Лариса Юрьевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Физика»
 Тел. (4862) 41-98-44
 E-mail: larafrolenkova@yandex.ru

Шоркин Владимир Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика»
 Тел. (4862) 41-98-44
 E-mail: vsorkin@yandex.ru

Якушина Светлана Ивановна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»
 Тел. (4862) 41-98-48

I.V. VITKOVSKIY, N.A. DOLGOV, L.Yu. FROLENKOVA, V.S. SHORKIN,
S.I. YAKUSHINA

MODEL OF DESTRUCTION OF THIN-FILM COVERINGS ON A DEFORMABLE BASIS

The method of calculation theoretical and real tensile strength of linearly elastic fragile materials is offered. In a basis the model of gradient material, which is a consequence of the theory of not local pair and triple interactions of continuum's particles is put. Estimated data is compared with known, presented in reference books.

Keywords: *theoretical and real tensile strength, gradient theory of elasticity, pair-wise and triple interactions of continuum's particles, microfissures, theory Griffiths.*

BIBLIOGRAPHY

1. Rabotnov, Yu.N. Vvedenie v mexaniku razrusheniya [Tekst] / Yu.N. Rabotnov. – M.: Nauka, 1987. – 80 s.
2. Novyj podxod k ocenke mexanicheskix svojstv tvyordyx tel e'kstremal'no malyx i e'kstremal'no bol'shix razmerov [Tekst] / A.L. Voly'nskiy [i dr.] // Rossijskiy ximicheskij zhurnal (Zhurnal Rossijskogo ximicheskogo obshhestva im. D.I. Mendeleeva). – 2006. – T. L. – № 5. – S. 126-133.
3. Voly'nskiy, A.L. Strukturnaya samoorganizaciya amorfnyx polimerov [Tekst] / A.L. Voly'nskiy, N.F. Bakeev. – M.: Fizmatlit, 2005. – 230 c.
4. Volinskii, A.L. Multiple Cracking of rigid platinum film covering polymer substrate [Text] / A.L. Volinskii, S.L. Bazhenov, O.V. Lebedeva, A.N. Ozerin, N.F. Bakeev // Journal of Applied Polymer Science. – 1999. – V. 72. – P. 1267-1275.
5. Nolte, A.J. Determining the Young's Modulus of Polyelectrolyte Multilayer Films via Stress-Induced Mechanical Buckling Instabilities [Text] / A. J. Nolte, M. F. Rubner, R. E. Cohen // Macromolecules. – 2005. – V. 38. – P. 5367-5370.
6. Vendamme, R. Synthesis and Micromechanical Properties of Flexible, Self-Supporting Polymer-SiO₂ Nanofilms [Text] / R. Vendamme, T. Ohzono, A. Nakao, M. Shimomura, T. Kunitake // Langmuir. – 2007. – V. 23. – P. 2792-2799.
7. Dolgov, M. Singulyarnist' napruzhen' pri stvorenni ta rujnuvanni vakuumno-dugovix pokrittiv [Tekst] / M. Dolgov, I. Smirnov // Visnik TNTU. Seriya Mexanika ta materialoznavstvo. – 2011. – T. 17. – № 2. – S.52-58.
8. Vitkovskij, I.V. Teoreticheskaya ocenka nesploshnosti adgezionnogo kontakta e'lementov zhidkometallicheskogo blanketa termoyadernogo reaktora [Tekst] / I.V. Vitkovskij, A.N. Konev, S.I. Yakushina, V.S. Shorkin / Zhurnal texnicheskoy fiziki. – 2007. – T. 77. – V. 6. – S. 28-33.
9. Frolenkova, L.Yu. Teoreticheskaya ocenka velichiny' prakticheskogo predela prochnosti [Tekst] / L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin, S.I. Yakushina // Fundamental'ny'e i prikladny'e problemy' texniki i texnologii. – 2011. – № 3. – S. 3-7.
10. Gutkin, M.Yu. Defekty' i mexanizmy' plastichnosti v nanostrukturnyx i nekristallicheskix materialax [Tekst] / M.Yu. Gutkin, I.A. Ovid'ko. – SPb.: Yanus, 2001. – 178 s.
11. Arnan, R. The Nonlocal Solution of the Elastic Half-Plane Loaded at the Origin by Shear Force [Text] / R. Arnan // Turk J Engin Environ Sci. – 2001. – V. 25. – P. 391-403.
12. Shorkin, V.S. Model' sploshnoj uprugoj sredy', osnovannaya na predstavlenii o dal'nodejstvuyushhem potencial'nom vzaimodejstvii ee chastic [Tekst] / V.S. Shorkin; pod red. I.A. Kijko, R.A. Vasina, G.L. Brovko // Uprugost' i neuprugost'. – M.: Lenand, 2006. – S. 271-282.
13. Shorkin, V.S. Uchyot vliyaniya trojnogo vzaimodejstviya chastic sredy' na poverxnostny'e i adgezion-ny'e svojstva tvyordyx tel [Tekst] // V.S. Shorkin, L.Yu. Frolenkova, A.S. Azarov // Materialovedenie. – 2011. – № 2. – S. 2-7.
14. Derengovskij, A.G. Konechnost' napryazhenij v okrestnosti vershiny' ploskogo klina [Tekst] / A.G. Derengovskij, L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin // Materialy IX Vserossijskoj mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoy konferencii «Mexaniki – XXI veku». Bratsk, 12-14 maya 2010 g., Bratskiy GU. – S. 25-29.
15. Derengovskij, A.G. Rezul'taty' raschyota napryazhenij v vershine ostroj rezhushhej kromki [Tekst] / A.G. Derengovskij // Uprochnyayushhie texnologii i pokry'tiya. – 2006. – № 12. – S. 54-56.
16. Svojstva e'lementov. Fizicheskie svojstva: Spravochnik [Tekst] / E.B. Samsonov. – M.: Metallurgiya, 1976. – 600 s.
17. Petch, N. Metallograficheskie aspekty' razrusheniya [Tekst] / N. Petch // Razrushenie. T. 1. Mikroskopicheskie i makroskopicheskie osnovy' mexaniki razrusheniya. – M.: Mir, 1973. – S. 376-420.

Vitkovskij Ivan Viktorovich

Federal State Unitary Enterprise D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus, St.-Petersburg

Doctor of technical science, leading research assistant

Tel. (812) 464-89-63

E-mail: vitkoviv@sintez.niiefa.spb.su

Dolgov Nikolaj Anatol'evich

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

Candidate of technical science, senior research assistant

Tel. (044) 286-69-57

E-mail: donika@inbox.ru

Frolenkova Larisa Yur'evna

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University – Education-Science-Production Complex", Orel

Candidate of physics and mathematics, associate professor, associate professor of department "Physics"

Tel. (4862) 41-98-44

E-mail: laraflenkova@yandex.ru

Shorkin Vladimir Sergeevich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University – Education-Science-Production Complex", Orel

Doctor of physics and mathematics, professor, head of department "Physics"

Tel. (4862) 41-98-44

E-mail: vsorkin@yandex.ru

Yakushina Svetlana Ivanovna

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University – Education-Science-Production Complex", Orel

Senior lecturer of department "Higher Mathematics"

Tel. (4862) 41-98-48

УДК 543.544.5.068.7(062):581.192(062)

В.А. ГАВРИЛИНА, С.Н. СЫЧЕВ

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА «ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ЖИДКОСТНАЯ ХРОМАТОГРАФИЯ – МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ» В ХЕМОСИСТЕМАТИКЕ РАСТЕНИЙ

Рассмотрена возможность применения комбинированного метода «высокоэффективная жидкостная хроматография – метод главных компонент» в хемосистематике растений. Показано, что метод может быть использован как для исследования эволюции растений, так и в теории катастроф.

Ключевые слова: хроматография, эволюция растений, катастрофы

ВВЕДЕНИЕ

В рамках многостороннего исследования процесса изменения окружающей среды Земли, весьма актуальную роль играют поиски зависимостей между данными о химическом составе организмов и теориями эволюционного развития и катастроф. Выявление подобных зависимостей [1, 2] может предоставить новые возможности в области изучения хронологии развития жизни на Земле, мировых катастроф и их взаимовлияния.

На сегодняшний день в распоряжении ученых уже находятся весьма обширные массивы данных о химическом составе живых организмов, в частности, растений. Значительная часть этих данных получена в рамках развития довольно молодой отрасли ботаники – хемосистематики [1, 3, 4]. Однако, несмотря на несомненный прогресс в поиске зависимостей между химическим составом растительных организмов и их положением в систематической иерархии, методами, используемыми в настоящее время в хемосистематике, довольно проблематично решить в целом поставленную задачу [2].

Комплексное решение задачи должно иметь в своей основе методы, позволяющие в целом иметь возможность интерпретации данных, полученных аналитически, прилагая к теоретическим данным о развитии биосферы Земли [3, 4]. Однако работа с большими массивами данных, которыми являются данные о химическом составе образцов растительного происхождения, значительно затрудняет процесс сравнения данных и их дальнейшей обработки. С этой целью необходимо изыскать возможность обобщения (свертки) полученной информации на различных уровнях ее обработки с возможностью восстановления исходных данных. Именно для работы с подобными биологическими объектами предлагается метод свертки информации (метод главных компонент), полученной методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с многоволновым спектрофотометрическим детектированием в УФ- и ВИД-областях.

ОСОБЕННОСТИ СРАВНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЛОЖНОГО ИЛИ НЕИЗВЕСТНОГО СОСТАВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА «ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ЖИДКОСТНАЯ ХРОМАТОГРАФИЯ МЕТОД – ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ» В ХЕМОСИСТЕМАТИКЕ РАСТЕНИЙ

Метод сравнения исследуемого образца (вещества, изделия или природного объекта) с контрольным (образцовым или стандартным) веществом, изделием или природным объектом, является основой большинства методов измерений и в том числе призван отвечать на вопросы:

- идентичны или не идентичны сравниваемые образцы;
- похожи (подобны) или не похожи сравниваемые образцы [1].

Сравнение осуществляется по следующему алгоритму:

1) веществу, изделию или природному явлению присваивается модель, содержащая ряд параметров, которые, по мнению авторов модели, позволяют идентифицировать исследуемый объект в смысле его дальнейшего использования или классификации;

2) путем сопоставления измеряемых (с определенной погрешностью) параметров модели исследуемых и контрольных (образцовых или стандартных) образцов исследуемый объект идентифицируется в смысле дальнейшего его использования или классификации.

В любом случае, при использовании метода сравнения возникают две задачи:

– разработка и выбор наиболее удачной в конкретном случае модели вещества, изделия или природного явления;

– определение необходимого и достаточного количества параметров для идентификации исследуемого объекта.

Выбор математической модели и способ задания количества параметров сложных (многопараметровых) объектов взаимозависимы. Так, при применении нелинейных моделей количество и, особенно, характер параметров определяется произвольно, исходя из производственной необходимости и экспериментального опыта. Параметры многопараметровых линейных моделей могут быть определены как по первому способу, т.е. достаточно произвольно, так и путем поиска линейно-независимых параметров линейной модели объекта, непосредственно не вводимых экспертом по своему усмотрению, но содержащихся в экспериментальной мультипараметрической информации. Особенно важен последний подход при сравнении объектов, имеющих сложный, до конца неизвестный химический состав (нефть, вино, растительные экстракты и т.д.). Компонентный состав таких объектов зависит от вида сырья и технологии, а не наоборот; количество параметров, необходимых и достаточных для описания и сравнения, неизвестно.

Алгоритм поиска линейно-независимых параметров линейной модели таких объектов реализован в методе главных компонент (МГК) [2, 3, 4].

Основным поставщиком мультипараметрических экспериментальных данных для МГК о составе и спектральных характеристиках указанных систем является метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с многоволновым спектрофотометрическим детектированием [5-9], а теоретической поддержкой поиска линейно-независимых параметров в многоволновых массивах хроматографических данных сложных систем является гипотеза о существовании небольшого количества линейно-независимых (базовых) электронных структур компонентов системы: все остальные электронные структуры соединений являются линейными комбинациями нескольких базовых.

Комбинированный метод «обращенно-фазовая жидкостная хроматография – метод главных компонент» (ОФ ВЭЖХ – МГК) обычно применяется при определении идентичности, подобия или не идентичности образцов сложного органического состава при спектрофотометрическом детектировании ВЭЖХ-хроматограмм в диапазоне длин волн 190-720 нм [9].

Процедура ОФ ВЭЖХ – МГК заключается в следующем:

– получение многоволновой хроматограммы исследуемого объекта в градиентном режиме ОФ ВЭЖХ с применением универсального элюента;

– представление многоволновой хроматограммы в виде матрицы оптических плотностей и транспонирование этой матрицы;

– получение линейно-независимых факторов методом главных компонент при обработке транспонированной матрицы оптических плотностей.

В случае существования банка данных таких факторов для контрольных образцов исследуемых объектов, полученные факторы исследуемого объекта сравниваются с факторами контрольных и по значениям коэффициентов корреляции «факторы банка – факторы исследуемого образца» делается вывод об идентичности или не идентичности сравниваемых объектов.

В результате подобной работы с большими по объему базами данных, свертка информации происходит в форме, позволяющей не только получать значения и вклады линейно-независимых факторов, но и в любой момент восстанавливать исходные данные для даль-

нейшей работы с ними. В подавляющем большинстве случаев обработка массивов данных любого объема предложенным методом сводится к формированию матрицы из ограниченного числа факторов. Процесс сравнения информации сводится к построению матрицы корреляции линейно-независимых факторов исследуемых экстрактов, полученных из многоволновых ВЭЖХ-хроматограмм для соединений, время появления которых в биологическом круговороте веществ приблизительно известно. Критерием идентичности, подобия или неидентичности комплексов систем соединений с известной хроноисторией служат коэффициенты корреляции линейно-независимых факторов.

Результаты первого этапа этой работы, выполненной авторами [1], оказались успешными: показана устойчивость качественного состава вторичных метаболитов одних и тех же таксономических единиц в разных экогеографических условиях. Таким образом, любые существенные изменения значений факторов, описывающих комплекс соединений, будет иметь эволюционный хронобиологический характер, а резкие изменения факторов – о скачке в эволюции, возможно имеющем причинами изменения на Земле катастрофического характера.

Следует обратить внимание на еще одну открывающуюся возможность использования предложенного нами комбинированного метода «высокоэффективная жидкостная хроматография – метод главных компонент» в теории катастроф.

Дело в том, что обобщенные линейно-независимые факторы являются точками линейно-независимых ВИД- и УФ-спектров поглощения при использовании в комплекте ВЭЖХ многоволновых спектрофотометрических детекторов. Такие спектры являются следствием электронных переходов при возбуждении растворов вещества (рис. 1).

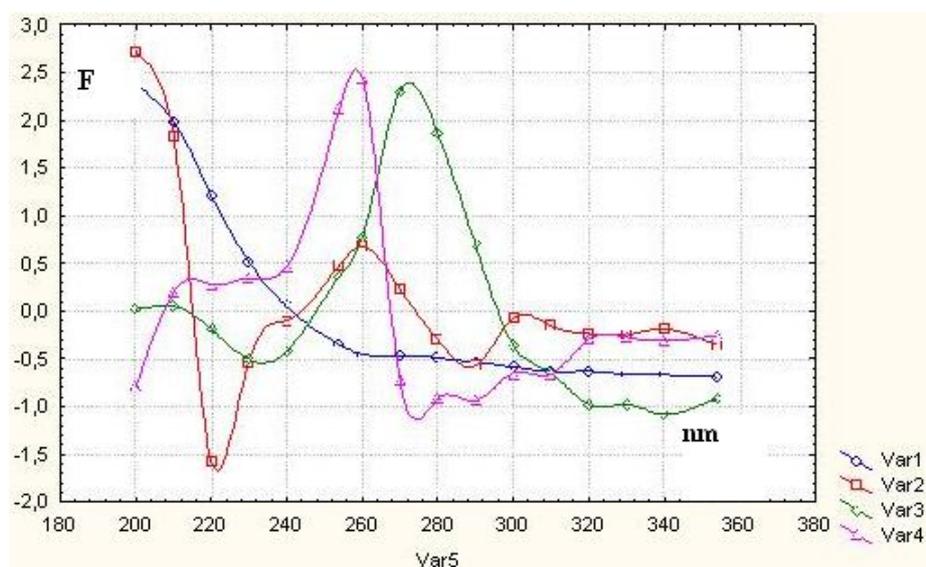


Рисунок 1 – Базовые линейно-независимые УФ-спектры вина «Каберне»

*По оси ординат – значения линейно-независимых факторов F_1 - F_4 (аналог оптической плотности).
По оси абсцисс – длины волн, нм*

Длины волн (частоты) могут быть получены при решении волнового уравнения Шредингера, причем для получения конкретного набора длин волн, должно быть применено возмущающее воздействие определенного вида. Таким образом, решив обратную задачу уравнения Шредингера для набора частот линейно независимых факторов, мы можем оценить и очертить круг возможных внешних воздействий.

ВЫВОДЫ

Применение комбинированного метода «высокоэффективная жидкостная хроматография – метод главных компонент» способно существенно продвинуть решение проблем применения хемосистематики в области эволюции и катастроф.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чадин, И. Хемосистематика – основа изучения биохимического разнообразия растений [Электронный ресурс] / И. Чадин. – Режим доступа: <http://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/01-46/07.html>.
2. Высочина, Г.И. Биохимические подходы к познанию биоразнообразия растительного мира [Текст] / Г.И. Высочина // Сибирский экологический журнал. – 1999. – № 3. – С. 207-211.
3. Бгатов, А.В. Биогенная классификация химических элементов [Текст] / А.В. Бгатов // Философия науки. – 1999. – № 2 (6). – С. 80-90.
4. Биологический энциклопедический словарь [Текст] / Гл. ред. М.С. Гиляров; редкол.: А.А. Бабаев [и др.]. – 2-е изд., исправ. – М.: Советская Энциклопедия, 1986. – 864 с.: ил.
5. Получение идентификационных признаков экстракта стевии комбинацией методов многоволновой ВЭЖХ и главных компонентов [Текст] / С.Н. Сычев [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2005. – № 12. – С. 36-39.
6. Применение метода главных компонент для идентификации и сравнения натуральных вин [Текст] / С.Н. Сычев [и др.] // Виноделие и виноградарство. – 2007. – № 1. – С. 45-56.
7. Применение метода главных компонент для идентификации и сравнения натуральных вин. Часть 2 [Текст] / С.Н. Сычев [и др.] // Виноделие и виноградарство. – 2007. – № 3. – С. 85-92.
8. Применение метода главных компонент для идентификации и сравнения натуральных вин. Часть 3 [Текст] / С.Н. Сычев [и др.] // Виноделие и виноградарство. – 2007. – № 4. – С. 132-136.
9. Комбинированная экспертная система определения подлинности виноградных вин [Текст] / С.Н. Сычев [и др.] // Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 4. – С.103-109.

Сычев Сергей Николаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Химия»
 Тел. (4862) 41-98-92
 E-mail: chemistry@ostu.ru

Гаврилина Вера Александровна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Кандидат технических наук, доцент
 Тел. (4862) 41-98-92
 E-mail: chemistry@ostu.ru

V.A. GAVRILINA, S.N. SY'CHYOV

PROSPECTS OF APPLICATION OF THE COMBINED METHOD «THE HIGHLY EFFECTIVE LIQUID CHROMATOGRAPHY – METHOD OF THE MAIN COMPONENTS» IN A HEMOSYSTEMATIZATION OF PLANTS

The possibility of using the combined method of «high performance liquid chromatography – the method of principal components» in chemosystematics plants was considered. It is shown that the method can be used for studying the evolution of plants, and in the theory of catastrophes.

Keywords: chromatography, the evolution of plant, catastrophes

BIBLIOGRAPHY

1. Chadin, I. Xemosistematika – osnova izucheniya bioximicheskogo raznoobraziya rastenij [E`lektronnyj resurs] / I. Chadin. – Rezhim dostupa: <http://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/01-46/07.html>.
2. Vy'sochina, G.I. Bioximicheskie podxody' k poznaniyu bioraznoobraziya rastitel'nogo mira [Tekst] / G.I. Vy'sochina // Sibirskij e`kologicheskij zhurnal. – 1999. – № 3. – S. 207-211.
3. Bgatov, A.V. Biogennaya klassifikaciya ximicheskix e`lementov [Tekst] / A.V. Bgatov // Filosofiya nauki. – 1999. – № 2 (6). – S. 80-90.

4. Biologicheskij e`nciklopedicheskij slovar` [Tekst] / Gl. red. M.S. Gilyarov; redkol.: A.A. Babaev [i dr.]. – 2-e izd., isprav. – M.: Sovetskaya E`nciklopediya, 1986. – 864 s.: il.
5. Poluchenie identifikacionny'x priznakov e`kstrakta stevii kombinaciej metodov mnogovolnnoj VE`ZHX i glavny'x komponentov [Tekst] / S.N. Sy'chyov [i dr.] // Xranenie i pererabotka sel`xozsy'r`ya. – 2005. – № 12. – S. 36-39.
6. Primenenie metoda glavny'x komponent dlya identifikacii i sravneniya natural'ny'x vin [Tekst] / S.N. Sy'chyov [i dr.] // Vinodelie i vinogradarstvo. – 2007. – № 1. – S. 45-56.
7. Primenenie metoda glavny'x komponent dlya identifikacii i sravneniya natural'ny'x vin. Chast` 2 [Tekst] / S.N. Sy'chyov [i dr.] // Vinodelie i vinogradarstvo. – 2007. – № 3. – S. 85-92.
8. Primenenie metoda glavny'x komponent dlya identifikacii i sravneniya natural'ny'x vin. Chast` 3 [Tekst] / S.N. Sy'chyov [i dr.] // Vinodelie i vinogradarstvo. – 2007. – № 4. – S. 132-136.
9. Kombinirovannaya e`kspertnaya sistema opredeleniya podlinnosti vinogradny'x vin [Tekst] / S.N. Sy'chyov [i dr.] // Izvestiya OrelGTU. Fundamental'ny'e i prikladny'e problemy' texniki i texnologii. – 2010. – № 4. – S.103-109.

Sy'chyov Sergej Nikolaevich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Doctor of technical science, professor of department “Chemistry”

Tel. (4862) 41-98-92

E-mail: chemistry@ostu.ru

Gavrilina Vera Aleksandrovna

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Candidate of technical science, associate professor

Tel. (4862) 41-98-92

E-mail: chemistry@ostu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 531/534.01

Ю.С. СТЕПАНОВ, Е.Т. КОБЯКОВ, А.И. ПОЛЯКОВ

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНОВ ИЗМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШЛИФОВАЛЬНОГО БЛОКА С НАКЛОННЫМ АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Получены аналитические зависимости для описания законов изменения массы и моментов инерции шлифовального блока с наклонным к плоскости вращения абразивным диском как следствие износа диска в процессе поверхностной обработки изделий.

Ключевые слова: наклонный абразивный диск, динамические параметры, законы изменения параметров, динамическая неуравновешенность.

Известные уже относительно давно нетрадиционные способы абразивной обработки поверхностей изделий наклонными к плоскости вращения шлифовальными кругами, как уже отмечалось в ряде работ авторов, например, [1, 2], позволяют заметно увеличить производительность технологического процесса при одновременном повышении качества обрабатываемых поверхностей. Однако достижение требуемого положительного эффекта возможно лишь при условии достаточно обоснованного выбора значений динамических параметров всего узла крепления наклонного абразивного диска. Прежде всего, это связано с необходимостью компенсации моментной неуравновешенности последнего, поскольку при высоких скоростях вращения из-за неуравновешенности диска возникают значительные знакопеременные нагрузки на подшипники шпинделя станка, вызывающие его вибрацию с соответствующими негативными последствиями.

Одна из предложенных авторами конструкций узла крепления наклонного абразивного диска, динамически уравновешенная на этапе проектирования, представлена на рисунке 1.

Абразивный диск 1 и уравновешивающий элемент из двух косых шайб 2 и 3 размещены на базовой втулке 4 шпинделя 5 станка по обе стороны диска 1.

Подробное описание конструкции содержится в [3], где также приведены расчетно-аналитические зависимости между параметрами конструкции, при соблюдении которых обеспечивается ее динамическая уравновешенность.

На этапе проектирования узла крепления диска 1 определяются необходимые значения геометрических параметров, частью из которых следует задаваться по конструктивно-технологическим соображениям: r , h , β , Δ^* , r_0 , s_1 (рис. 1). Вслед за этим определяется необходимое значение параметра r_1 (наружный радиус уравновешивающего элемента):

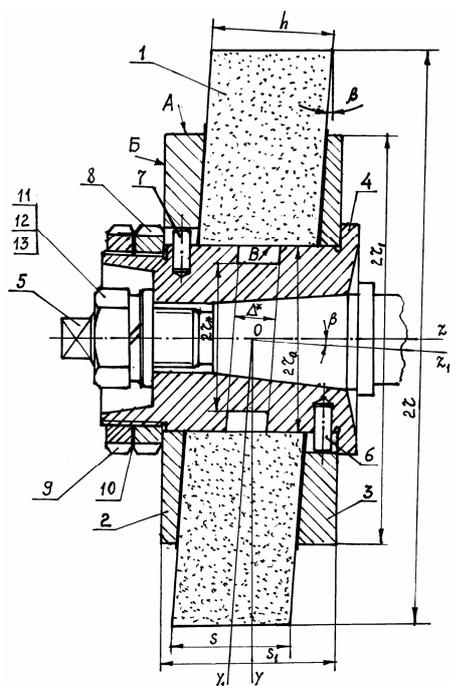


Рисунок 1 – Конструктивная схема узла крепления наклонного к плоскости вращения абразивного круга

$$r_1 = r \cdot \sqrt[4]{\mu + \frac{r_0^4}{r^4} \left[1 - \mu - \mu^* \cdot \frac{\Delta^*}{h} \left(1 - \frac{r_*^4}{r^4} \right) \right]}, \quad (1)$$

где $\mu = \rho_1 / \rho_2$;

$\mu^* = \rho_3 / \rho_2$;

ρ_1, ρ_2, ρ_3 – плотности материалов диска, косых шайб и базовой втулки, соответственно;
 h – толщина наклонного диска.

При выполнении условия (1) моментная неуравновешенность узла крепления диска 1 отсутствует.

Очевидно, что по мере износа периферийных слоев абразивного диска 1, то есть при уменьшении значения параметра r , возникает моментная неуравновешенность.

В связи с этим в [3] предложен способ ступенчатой корректировки моментной неуравновешенности, состоящий в замене уравнивающего элемента, значение параметра r_1 которого определяется по формуле (1).

Определенный теоретический и практический интерес представляет задача определения законов изменения динамических параметров шлифовального блока по мере износа периферийных слоев абразивного диска.

На рисунке 2 показаны выделенные из узла крепления (рис. 1) наклонный абразивный диск 1 и уравнивающий элемент из двух косых шайб 2 и 3, образующие блок, динамически уравновешенный на этапе проектирования.

С целью вывода необходимых расчетно-аналитических зависимостей представим диск 1 в пределах возможного износа ($r - r_1$) в виде совокупности кольцевых слоев одинаковой толщины Δ , которые пронумеруем в направлении от периферии к центру (рис. 2).

Принятые обозначения:

$R_i (i = 1, 2, \dots, N)$ – средние радиусы удаляемых в процессе резания кольцевых слоев толщиной Δ ;

ω – угловая скорость вращения ротора;

$\varphi = \omega t$ – угол поворота ротора за время t ;

$OXYZ$ – неподвижная система координат;

$Oxyz$ – система координат, связанная с ротором;

z – ось вращения.

Принимаем следующую модель абразивного износа диска 1: средний радиус удаляемого кольцевого слоя за счет износа диска 1 в процессе шлифования считаем постоянным до того момента времени, пока ротор не повернется на угол $\varphi = 360^\circ$. При этом слой малой толщины Δ исчезает за один оборот ротора и в этот же момент скачком на величину Δ начинается удаление следующего слоя, который также снимается за один оборот ротора и так далее. Всего удаляется N слоев постоянной толщины Δ :

$$N = (r - r_1) / \Delta. \quad (2)$$

Соответствующее время:

$$t_* = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{r - r_1}{\Delta}. \quad (3)$$

Время полного износа диска t_* может быть определено опытным путем. Тогда величина износа за один оборот ротора будет:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{r - r_1}{t_*} = \frac{T}{t_*} (r - r_1), \quad (4)$$

где T – время одного оборота ротора, за которое удаляется слой толщиной Δ .

Заметим, что аналогичный подход используется при анализе процесса намотки ленты на цилиндрическую поверхность барабана [4], что позволяет получить достаточно простые зависимости.

Принятую модель абразивного износа диска 1 применим к выводу расчетно-аналитических зависимостей, характеризующих законы изменения динамических параметров блока (рис. 2).

Выделив из диска 1 сектор со средним радиусом R_n кольцевого слоя (рис. 3), находим координаты его центра масс.

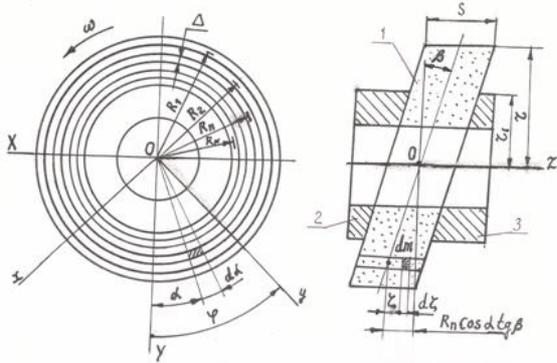


Рисунок 2 – Блок, динамически уравновешенный на этапе проектирования

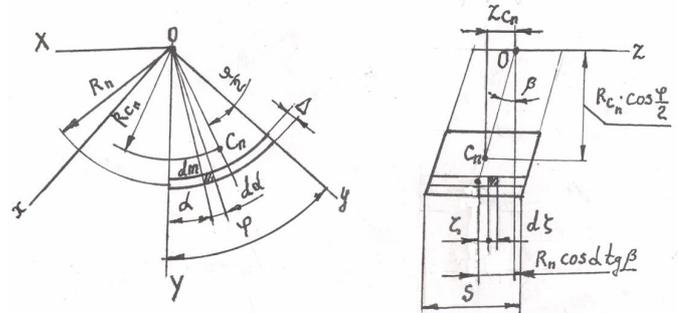


Рисунок 3 – Координаты центра масс сектора

Радиальная координата:

$$R_{cn} = R_n \sin \frac{\varphi}{2} / \frac{\varphi}{2}. \quad (5)$$

Декартовы координаты в системе координат $Oxyz$, связанной с ротором:

$$x_{cn} = R_n \cdot \frac{2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}}{\varphi}; \quad y_{cn} = R_n \cdot \frac{\sin \varphi}{\varphi}; \quad z_{cn} = -R_n \cdot \frac{\sin \varphi}{\varphi} \operatorname{tg} \beta. \quad (6)$$

где

$$R_n = r - \left(n - \frac{1}{2} \right) \Delta - \quad (7)$$

средний радиус слоя толщиной Δ с порядковым номером n .

Из (5)-(7) следует, что координаты центра масс кольцевого сектора находятся в зависимости от угла φ и номера удаляемого слоя.

Определим массу и координаты центра масс всего блока, представленного на рисунке 2, как функции угла φ , соответствующего номеру n удаляемого слоя. После снятия слоя с номером $(n - 1)$ масса блока (рис. 2) уменьшается до величины:

$$M_n = M_0 - \rho_1 \pi s \left[r^2 - \left(R_n + \frac{\Delta}{2} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где M_0 – начальная масса блока при отсутствии моментной неуравновешенности;

M_n – полная масса блока перед началом снятия слоя с номером n .

Тогда в процессе снятия n -го слоя соответствующая (текущая) масса блока будет уменьшаться по закону:

$$M_n^* = M_0 - \rho_1 \pi s \left[r^2 - \left(R_n + \frac{\Delta}{2} \right)^2 \right] - \rho_1 R_n \varphi s \Delta, \quad (9)$$

где последнее слагаемое есть масса m_n^* удаляемого сектора с углом φ и средним радиусом кольцевого слоя R_n , определяемым по (7):

$$m_n^* = \rho_1 s \Delta R_n \varphi. \quad (10)$$

Радиальную координату R_c^* центра масс блока (рис. 2) находим из условия:

$$M_n^* \cdot R_c^* = -m_n^* \cdot R_{c_n},$$

откуда, приняв во внимание (9), (5) и (10), находим:

$$R_c^* = -2 \cdot R_n \frac{\sin \frac{\varphi}{2}}{\frac{M_0}{\rho_1 R_n s \Delta} - \frac{\pi r^2}{R_n \Delta} \left[1 - \left(R_n + \frac{\Delta}{2} \right)^2 / r^2 \right] - \varphi}. \quad (11)$$

Знак «-» указывает на то, что центр масс блока (C) и центр масс удаляемого элемента с углом φ (C_n) расположены по разные стороны от начала координат на оси симметрии сектора.

В подвижной системе координат, связанной с ротором, декартовы координаты центра масс блока (рис. 2) определяются по формулам:

$$x_c^* = R_c^* \cdot \sin \frac{\varphi}{2}; \quad (12)$$

$$y_c^* = R_c^* \cdot \cos \frac{\varphi}{2}; \quad (13)$$

$$z_c^* = -R_c^* \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \operatorname{tg} \beta. \quad (14)$$

Таким образом, в процессе абразивной обработки поверхности изделия за счет износа периферийных слоев шлифовального круга (диска 1) центр масс ротора перемещается.

Как следует из (11)-(14), центр масс блока (рис. 2), перемещается по замкнутой кривой. В проекции на плоскость, перпендикулярную оси вращения, траектории центра масс имеют вид, схематично показанный на рисунке 4.

Каждая из семейства этих траекторий, соответствующая номеру удаляемого слоя, касается начала координат. При их построении целесообразно пользоваться способом обращения движения, остановив систему осей $Oxyz$, связанную с ротором, и вращая систему $OXYz$ в направлении, обратном направлению вращения ротора (на рисунке 4 – по ходу часовой стрелки). По мере снятия периферийных слоев диска 1 (рис. 2) наибольшее перемещение центра масс блока уменьшается, что следует из анализа формулы (11).

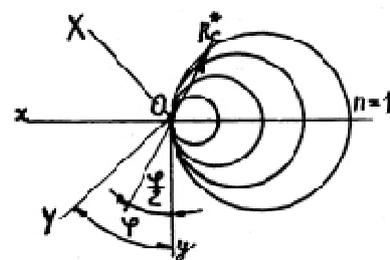


Рисунок 4 – Схема траектории центра масс блока

Установим законы изменения моментов инерции шлифовального блока (рис. 2) в процессе послойного абразивного износа диска 1.

Осевые моменты инерции кольцевого сектора с углом φ , соответствующие слою с номером n , относительно осей, связанных с ротором (рис. 3):

$$J_z^{(n)} = \int_{m_n^*} R_n^2 dm; \quad (15)$$

$$J_x^{(n)} = \int_{m_n^*} \left[(R_n \cos(\varphi - \alpha))^2 + (R_n \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta - \zeta)^2 \right] dm; \quad (16)$$

$$J_y^{(n)} = \int_{m_n^*} \left[(R_n \sin(\varphi - \alpha))^2 + (R_n \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta - \zeta)^2 \right] dm. \quad (17)$$

Центробежные моменты:

$$J_{xz}^{(n)} = \int_{m_n^*} [R_n \sin(\varphi - \alpha)(-R_n \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta + \zeta)] dm; \quad (18)$$

$$J_{yz}^{(n)} = \int_{m_n^*} [R_n \cos(\varphi - \alpha)(-R_n \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta + \zeta)] dm, \quad (19)$$

где

$$dm = \rho_1 R_n d\alpha \cdot d\zeta \cdot \Delta -$$

элементарная масса;

m_n^* – масса сектора, соответствующая слою с номером n .

В результате интегрирования из (15)-(19) находим:

$$J_z^{(n)}(\varphi) = \rho_1 R_n^3 \Delta \cdot s \varphi; \quad (20)$$

$$J_x^{(n)}(\varphi) = \rho_1 R_n^3 s \Delta \left[\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\sin 2\varphi}{4} \right) (1 + \operatorname{tg}^2 \beta) + \frac{\varphi}{12} \cdot \frac{s^2}{R_n^2} \right]; \quad (21)$$

$$J_y^{(n)}(\varphi) = \rho_1 R_n^3 s \Delta \left[\frac{\varphi}{2} \left(1 + \operatorname{tg}^2 \beta + \frac{s^2}{6R_n^2} \right) - \frac{1}{4} \sin 2\varphi (1 - \operatorname{tg}^2 \beta) \right]; \quad (22)$$

$$J_{xz}^{(n)}(\varphi) = -\rho_1 R_n^3 s \Delta \frac{\operatorname{tg} \beta}{2} \varphi \sin \varphi; \quad (23)$$

$$J_{yz}^{(n)}(\varphi) = -\frac{1}{2} \rho_1 R_n^3 s \Delta \operatorname{tg} \beta (\varphi \cos \varphi + \sin \varphi), \quad (24)$$

где средний радиус R_n слоя с номером n определен в (7).

Из (20)-(24) при $\varphi = 2\pi$ имеем:

$$J_z^{(n)}|_{\varphi=2\pi} = m_n R_n^2; \quad (25)$$

$$J_x^{(n)}|_{\varphi=2\pi} = \frac{1}{2} m_n R_n^2 \left(1 + \operatorname{tg}^2 \beta + \frac{s^2}{6R_n^2} \right) = J_y^n|_{\varphi=2\pi}; \quad (26)$$

$$J_{xz}^n|_{\varphi=2\pi} = 0; \quad (27)$$

$$J_{yz}^{(n)}|_{\varphi=2\pi} = -\frac{1}{2} m_n R_n^2 \operatorname{tg} \beta, \quad (28)$$

где

$$m_n = 2\rho_1 \pi R_n s \Delta - \quad (29)$$

масса кольцевого слоя s с номером n .

Первоначальные значения моментов инерции всего блока (рис. 2), которые обозначим $J_{z,0}$; $J_{x,0}$; $J_{y,0}$; $J_{xz,0}$; $J_{yz,0}$, можно считать известными, так как их значения нетрудно найти по формулам, приведенным в [1]. Причем $J_{xz,0} = J_{yz,0} = 0$, поскольку в начальном состоянии блок предполагается динамически сбалансированным.

После снятия в результате абразивного износа слоя с номером $(n - 1)$ моменты инерции изменятся на величины, определяемые по формулам [5], которые представим в виде:

$$\Delta J_x^{(n)} = \Delta J_y^{(n)} = \frac{\Delta M_n r^2}{4} \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{s^2}{r^2} + (1 + \operatorname{tg}^2 \beta) (1 + k_n^2) \right];$$

$$\Delta J_z^{(n)} = \frac{\Delta M_n r^2}{2} (1 + k_n^2)$$

$$\Delta J_{xz}^{(n)} = 0; \quad \Delta J_{yz}^{(n)} = -\frac{\Delta M_n r^2}{4} (1 + k_n^2) \operatorname{tg} \beta,$$

где в данном случае

$$\Delta M_n = \pi \rho_1 r^2 s (1 - k_n^2) = M_{0,1} (1 - k_n^2) \quad (30)$$

$$k_n = \frac{1}{r} \left(R_n + \frac{\Delta}{2} \right); \quad (31)$$

$$M_{0,1} = \pi \rho_1 r^2 s - \quad (32)$$

масса диска 1 (рис. 2) без учета посадочного отверстия, ΔM_n – уменьшение массы блока к началу снятия слоя n .

При учете (7) из (31) имеем:

$$k_n = 1 - (n-1) \frac{\Delta}{r}. \quad (33)$$

Следовательно, после снятия слоя с номером $(n-1)$ моменты инерции изменятся на величины, определяемые следующим образом:

$$\Delta J_x^{(n)} = \Delta J_y^{(n)} = \frac{M_{0,1} r^2}{4} (1 - k_n^2) \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{s^2}{r^2} + (1 + \operatorname{tg}^2 \beta) (1 + k_n^2) \right]; \quad (34)$$

$$\Delta J_z^{(n)} = \frac{M_{0,1} r^2}{2} (1 - k_n^4) \quad (35)$$

$$\Delta J_{xz}^{(n)} = 0; \quad \Delta J_{yz}^{(n)} = -\frac{M_{0,1} r^2}{4} \operatorname{tg} \beta (1 - k_n^4) \quad (36)$$

Заметим, что при $n=1$, $k_n = k_1 = 1$ и все изменения массы и моментов инерции равны нулю, что соответствует моменту начала снятия первого слоя. Индексу n в выше приведенных зависимостях соответствует момент начала снятия слоя n .

Аналогичным образом, введя параметр k_n , преобразуем формулу (11).

$$R_c^* = -2 \cdot R_n \frac{\sin \frac{\varphi}{2}}{2\pi \left[\frac{M_{0,1}}{m_n} \left(\frac{M_0}{M_{0,1}} - 1 + k_n^2 \right) - \frac{\varphi}{2\pi} \right]}, \quad (37)$$

где m_n определяется по (29), а $M_{0,1}$ – по (32).

Введя обозначение \bar{r}_n для относительного среднего радиуса слоя n :

$$\bar{r}_n = \frac{R_n}{r} = k_n - 0,5 \frac{\Delta}{r} \quad (38)$$

и приняв во внимание выражение (29) для массы этого слоя, представим формулы (20)-(24) в виде:

$$J_x^{(n)}(\varphi) = m_n r^2 \left[\frac{(\bar{r}_n)^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{\sin 2\varphi}{2\varphi} \right) (1 + \operatorname{tg}^2 \beta) + \frac{1}{12} \cdot \frac{s^2}{r^2} \right] \cdot \frac{\varphi}{2\pi}; \quad (39)$$

$$J_y^{(n)}(\varphi) = m_n r^2 \left[\frac{(\bar{r}_n)^2}{2} \cdot \left(1 + \operatorname{tg}^2 \beta - \frac{\sin 2\varphi}{2\varphi} \cdot (1 - \operatorname{tg}^2 \beta) \right) + \frac{1}{12} \cdot \frac{s^2}{r^2} \right] \cdot \frac{\varphi}{2\pi} =$$

$$= J_x^{(n)}(\varphi) - m_n R_n^2 \frac{\sin 2\varphi}{4\pi}; \quad (40)$$

$$J_z^{(n)} = m_n R_n^2 \frac{\varphi}{2\pi}; \quad (41)$$

$$J_{xz}^{(n)} = -m_n R_n^2 \frac{\operatorname{tg}\beta}{2} \frac{\varphi}{2\pi} \sin \varphi; \quad (42)$$

$$J_{yz}^{(n)} = -m_n R_n^2 \frac{\operatorname{tg}\beta}{2} \frac{\varphi}{2\pi} \left(\cos \varphi + \frac{\sin \varphi}{\varphi} \right). \quad (43)$$

Формула (8) для вычисления массы блока после снятия слоя с номером $(n - 1)$, то есть в момент времени, соответствующий началу снятия n -го слоя, при учете (30)-(32) принимает вид:

$$M_n = M_0 - M_{0,1} (1 - k_n^2) \quad (44)$$

Аналогичный вид имеет формула (9):

$$M_n^* = M_0 - M_{0,1} (1 - k_n^2) - m_n \frac{\varphi}{2\pi} = M_n - m_n \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (45)$$

Полученные зависимости, позволяют установить законы изменения моментов инерции блока (рис. 2) в результате послойного износа абразивного диска.

Принимая во внимание (34)-(36), (39)-(43), получим:

$$\begin{aligned} J_{x,n}^* &= J_{x,0} - \Delta J_x^{(n)} - J_x^{(n)}(\varphi) = \\ &= J_{x,0} - \frac{M_{0,1} r^2}{4} (1 - k_n^2) \left[\frac{1}{3} \frac{s^2}{r^2} + (1 + \operatorname{tg}^2 \beta) (1 + k_n^2) \right] - \\ &- m_n r^2 \left[\frac{(r_n^-)^2}{2} \left(1 + \frac{\sin 2\varphi}{2\varphi} \right) (1 + \operatorname{tg}^2 \beta) + \frac{1}{12} \cdot \frac{s^2}{r^2} \right] \cdot \frac{\varphi}{2\pi}; \end{aligned} \quad (46)$$

$$J_{y,n}^* = J_{y,0} - \Delta J_y^{(n)} - J_y^{(n)}(\varphi) = J_{x,n}^* + \frac{m_n R_n^2}{4\pi} \sin 2\varphi; \quad (47)$$

$$J_{z,n}^* = J_{z,0} - \Delta J_z^{(n)} - J_z^{(n)}(\varphi) = J_{z,0} - \frac{M_{0,1} r^2}{2} (1 - k_n^4) - m_n R_n^2 \frac{\varphi}{2\pi}; \quad (48)$$

$$J_{xz,n}^* = J_{xz,0} - \Delta J_{xz}^{(n)} - J_{xz}^{(n)}(\varphi) = m_n R_n^2 \frac{\operatorname{tg}\beta}{2} \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \sin \varphi; \quad (49)$$

$$J_{yz,n}^* = J_{yz,0} - \Delta J_{yz}^{(n)} - J_{yz}^{(n)}(\varphi) = \frac{\operatorname{tg}\beta}{2} \left[\frac{M_{0,1} r^2}{2} (1 - k_n^4) + m_n R_n^2 \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \left(\cos \varphi + \frac{\sin \varphi}{\varphi} \right) \right]. \quad (50)$$

Таким образом, согласно зависимостям (45)-(50) масса и моменты инерции блока (рис. 2) в соответствии с принятой моделью абразивного износа диска 1 являются функциями номера n слоя, удаляемого за один оборот ротора, и угла $\varphi = \omega t$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$.

Заметим, что слагаемые в (45)-(50), не содержащие φ , по численному значению значительно превышают последние.

Чтобы описать закономерности изменения динамических параметров в процессе абразивного износа диска 1, целесообразно воспользоваться способом аппроксимации кривых, построенных на основе выражений (45)-(50).

В результате проведенных исследований получены следующие приближенные зависимости, обеспечивающие достаточно высокую точность анализа:

$$M_n^* = M_0 - M_{0,1} C_n - \frac{\varphi}{2\pi} m_1 D_n; \quad (51)$$

$$J_{x,n}^* = J_{x,0} - \frac{M_{0,1}r^2}{4} \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{s^2}{r^2} C_n + (1 + \operatorname{tg}^2 \beta) E_n \right] - \frac{\varphi}{2\pi} \left[(1 + \operatorname{tg}^2 \beta) \frac{m_1 R_1^2}{2} F_n \cdot \left(1 + \frac{\sin 2\varphi}{2\varphi} \right) + \frac{m_1 s^2}{12} D_n \right]; \quad (52)$$

$$J_{y,n}^* = J_{x,n}^* + \frac{m_1 R_1^2}{4\pi} F_n \sin 2\varphi; \quad (53)$$

$$J_{z,n}^* = J_{z,0} - \frac{M_{0,1}r^2}{2} E_n - \frac{\varphi}{2\pi} m_1 R_1^2 F_n; \quad (54)$$

$$J_{xz,n}^* = \operatorname{tg} \beta \frac{m_1 R_1^2}{2} F_n \frac{\varphi}{2\pi} \sin \varphi; \quad (55)$$

$$J_{yz,n}^* = \frac{\operatorname{tg} \beta}{2} \left[\frac{M_{0,1}r^2}{2} E_n + m_1 R_1^2 F_n \frac{\varphi}{2\pi} \left(\cos \varphi + \frac{\sin \varphi}{\varphi} \right) \right]. \quad (56)$$

где

$$\left. \begin{aligned} C_n &= \frac{n-1}{N-1} \left(A_1 - \frac{n-1}{N-1} A_2 \right); \quad D_n = 1 - \frac{n-1}{N-1} \cdot \left(1 - \frac{m_N}{m_1} \right); \\ A_1 &= 3 - 4k_{n_*}^2 + k_N^2; \quad A_2 = 2 - 4k_{n_*}^2 + 2k_N^2 = A_1 + k_N^2 - 1; \\ E_n &= \frac{n-1}{N-1} \left(A_3 - \frac{n-1}{N-1} A_4 \right); \quad F_n = 1 - \frac{n-1}{N-1} \cdot \left(B_1 - \frac{n-1}{N-1} B_2 \right); \\ A_3 &= 3 - 4k_{n_*}^4 + k_N^4; \quad A_4 = 2 - 4 \cdot k_{n_*}^4 + 2k_N^4 = A_3 + k_N^4 - 1; \\ B_1 &= 3 - \frac{4m_{n_*} R_{n_*}^2 - m_N R_N^2}{m_1 R_1^2}; \quad B_2 = 2 - \frac{4m_{n_*} R_{n_*}^2 - 2m_N R_N^2}{m_1 R_1^2} = B_1 + \frac{m_N R_N^2}{m_1 R_1^2} - 1. \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

При этом индекс $n_* = (N - 1) / 2$, параметры k_{n_*} , k_N , m_N , R_{n_*} определяются по формулам (33), (29), (7) с соответствующей заменой индекса n .

Сопоставление результатов, получаемых на основе (45)-(50) и (51)-(56), показывает, что расхождение не превышает 3-4 %.

При малой величине Δ -износа слагаемые в (51)-(56), содержащие угол φ и характеризующие изменение динамических параметров во время одного оборота ротора, малы по сравнению с начальными значениями динамических параметров, то есть при $\varphi = 0$.

Графическое представление полученных зависимостей для одной из предложенных конструкций (рис. 1) приведено на рисунке 5, где показаны изменения динамических параметров в зависимости от номера n удаляемого слоя, и на рисунке 6, показывающем закономерности изменения моментов инерции в течение одного оборота ротора на примере снятия слоя с номером $n = 30$.

Для параметров M_n^* и $J_{z,n}^*$ имеет место более простая (линейная) зависимость от угла φ .

На рисунке 5 под углом ψ понимается угол поворота ротора с момента начала технологического процесса абразивной обработки поверхности изделия.

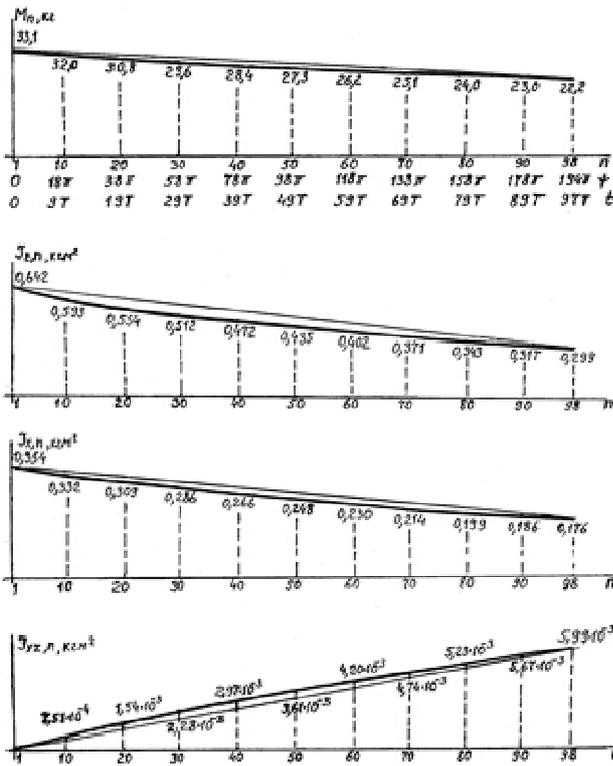


Рисунок 5 – Графики динамических параметров

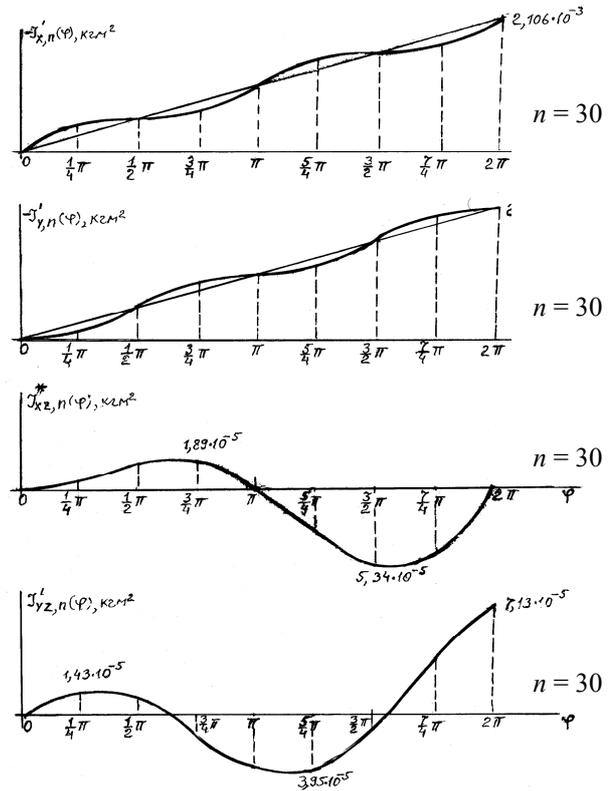


Рисунок 6 – Графики зависимости динамических параметров от $\varphi = \omega t$

При этом имеет место зависимость:

$$\psi_n = 2\pi(n - 1) = \omega t_n, \tag{58}$$

где ψ_n – угол поворота ротора, соответствующий началу снятия слоя n , а t_n – время начала снятия этого слоя.

Из (58) следует:

$$t_n = T \cdot (n - 1),$$

где $T = 2\pi / \omega$ – время одного оборота ротора, за которое удаляется один слой толщиной Δ , при его угловой скорости ω .

Для определения времени начала снятия последнего слоя имеем:

$$t_N = T \cdot (N - 1).$$

Поэтому входящее в (57) отношение $(n - 1) / (N - 1)$ может рассматриваться как отношение t_n / t_N .

Очевидно, что постепенное увеличение значения центробежного момента инерции J_{yz} , возникающее за счет абразивного износа диска 1 (рис. 1), приводит к увеличению моментной неуравновешенности последнего и может иметь негативные последствия, для уменьшения вредного влияния которых, как уже отмечалось, предложен способ ступенчатой корректировки моментной неуравновешенности [3].

В заключение обратим внимание на то, что смещение центра тяжести блока (рис. 2), даваемое формулой (11), при малой величине Δ -износа оказывается малым, что дает возможность рассматривать моменты инерции блока относительно осей x, y как центральные, то есть при анализе колебательных процессов роторной системы смещение центра масс допустимо не учитывать. Вместе с тем, аналитические зависимости (45-50) и являющиеся их следствиями зависимости (51)-(56) в этом случае могут быть полезны для целей расчетно-конструкторской практики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов, Ю.С. К оптимизации значений геометрических параметров структурно-неоднородного жесткого ротора с наклонным диском [Текст] / Ю.С. Степанов, Е.Т. Кобяков // Вестник машиностроения. – 2002. – № 1. – С. 3-7.
2. Степанов, Ю.С. Некоторые задачи механики роторов технологических систем [Текст] / Ю.С. Степанов, Е.Т. Кобяков, А.И. Поляков; под общ. ред. Ю.С. Степанова. – М.: Спектр, 2011. – 276 с.
3. Пат. 2345342 Российская Федерация, МПК⁸ G01M1/38. Устройство установки и компенсации моментной неуравновешенности наклонного к плоскости вращения диска [Текст] / Степанов Ю.С. [и др.]; патентообладатель ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет» (ОрелГТУ). – № 2007124263/28; заявл. 27.06.2007; опубл. 27.01.2009, Бюл. № 3. – 9 с.
4. Бессонов, А.П. Основы динамики механизмов с переменной массой звеньев [Текст] / А.П. Бессонов. – М.: Наука, 1967. – 279 с.
5. Степанов, Ю.С. Расчетный метод уравнивания структурно-неоднородного жесткого ротора с наклонным диском [Текст] / Ю.С. Степанов, Е.Т. Кобяков // Справочник. Инженерный журнал. – 1999. – № 10. – С. 20-23.

Степанов Юрий Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Доктор технических наук, профессор, директор Научно-образовательного Центра нанотехнологий
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 47-50-71
E-mail: stepanov@ostu.ru

Кобяков Евгений Тихонович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Динамика и прочность машин»
302038, г. Орел, ул. Октябрьская, 43, кв. 31
Тел. (4862) 45-64-51

Поляков Алексей Иванович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-18
E-mail: upk@ostu.ru

Yu.S. STEPANOV, E.T. KOPYAKOV, A.I. POLYAKOV

TO A QUESTION OF DEFINITION OF LAWS OF CHANGE OF DYNAMIC PARAMETERS OF THE GRINDING BLOCK WITH THE INCLINED ABRASIVE TOOL

Analytical dependences for the description of the moments of inertia of the grinding block with inclined to a rotation plane an abrasive disk as consequence of deterioration of a disk in the course of superficial processing of products are received.

Keywords: *inclined abrasive disk, dynamic parameters, laws of change of parameters, dynamic unbalance.*

BIBLIOGRAPHY

1. Stepanov, Yu.S. K optimizacii znachenij geometricheskix parametrov strukturno-neodnorodnogo zhyostkogo rotora s naklonny'm diskom [Tekst] / Yu.S. Stepanov, E.T. Kobayakov // Vestnik mashinostroeniya. – 2002. – № 1. – S. 3-7.

2. Stepanov, Yu.S. Nekotory'e zadachi mexaniki rotorov texnologicheskix sistem [Tekst] / Yu.S. Stepanov, E.T. Kobyakov, A.I. Polyakov; pod obshh. red. Yu.S. Stepanova. – M.: Spektr, 2011. – 276 s.
3. Pat. 2345342 Rossijskaya Federaciya, MPK8 G01M1/38. Ustrojstvo ustanovki i kompensacii momentnoj neuravnoveshennosti naklonnogo k ploskosti vrashheniya diska [Tekst] / Yu.S. Stepanov [i dr.]; patentoobladatel' GOU VPO «Orlovskij gosudarstvennyj texniceskij universitet» (OrelGTU). – № 2007124263/ 28; zayavl. 27.06.2007; opubl. 27.01.2009, Byul. № 3. – 9 s.
4. Bessonov, A.P. Osnovy' dinamiki mexanizmov s peremennoj massoj zven'ev [Tekst] / A.P. Bessonov. – M.: Nauka, 1967. – 279 s.
5. Stepanov, Yu.S. Raschyotnyj metod uravnoveshivaniya strukturno-neodnorodnogo zhyostkogo rotora s naklonny'm diskom [Tekst] / Yu.S. Stepanov, E.T. Kobyakov // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. – 1999. – № 10. – S. 20-23.

Stepanov Yuriy Sergeevich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Doctor of technical science, professor, director of Research and Education Center for Nanotechnology

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. (4862) 47-50-71

E-mail: stepanov@ostu.ru

Kobyakov Evgenij Tixonovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Candidate of technical science, associate professor, professor of department “Dynamics and Strength of Machines”

302038, Orel, ul. Oktjabrskaja, 43, kv. 31

Tel. (4862) 45-64-51

Polyakov Aleksej Ivanovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Candidate of technical science, associate professor, associate professor of department “Machine Building Technology and Design Technology Computer Science”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. (4862) 41-98-18

УДК 621.928.9(035)

Ю.А. АЛТУХОВ, С.М. КИСЛЯК, АЛЬ ЗАМИЛИ АЛИ МИРАЛИ ДЖАСИМ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В РАЗНЫХ ТИПАХ ЗОЛОУЛОВИТЕЛЕЙ

В данной статье экспериментально и теоретически изучается трехмерная аэродинамика турбулентного течения запыленного газа в золоуловителях (центробежный золоуловитель (ЦЗУ) и лабиринтный золоуловитель (ЛЗУ)).

Численное исследование основано на трехмерных уравнениях Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, а описание движения частиц в ЦЗУ и ЛЗУ базируется на модели Лагранжа. Алгоритм численного анализа течения запыленного потока через ЦЗУ и ЛЗУ включают метод контрольного объема с различными формами ячеек и SIMPLE алгоритм. В работе использованы 2 разные модели турбулентности – (k-ε) модель и RNG (k-ε) модель. Показано, что использованная методика исследования процессов улавливания частиц в золоуловителях может использоваться для золоуловителей и других конструкций после соответствующего выбора модели турбулентности, описывающей особенности течения сильно закрученных турбулентных потоков.

Ключевые слова: золоуловитель, трехмерное турбулентное течение, контрольная объем, запыленный поток, модель Лагранжа.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема инженерной защиты атмосферного воздуха от техногенных выбросов промышленных предприятий в мире и в России чрезвычайно важна. По прогнозам министерства природных ресурсов РФ с 2030 г. первенство в топливно-энергетическом балансе в России займут уголь и атомная энергетика, что потребует конструктивного и технологического совершенствования золоочистного оборудования.

В котельной технике для очистки газа от твердых частиц в основном используются центробежные и инерционные золоуловители.

Для снижения запыленности окружающей среды на практике используют процессы улавливания пыли и золы с последующей очисткой запыленного воздуха в различных аппаратах. Золоуловитель – это аппарат для очистки дымовых газов от летучей золы.

Технические, экономические и технологические разработки, направленные на повышение эффективности золоуловителей, невозможны без изучения гидродинамических особенностей процесса осаждения частиц и их движения в несущем газовом потоке. Теоретические исследования этих процессов на базе известных математических моделей движения аэрозольной частицы в закрученном потоке позволяет оценить эффективность пылеулавливания различных устройств и выявить влияющие на нее факторы.

Течение в золоуловителях циклонного типа достаточно сложно и на пути численного исследования встречается много трудностей. Основная трудность является следствием того факта, что турбулентность, наблюдаемая в золоуловителях, является существенно анизотропной, что требует модификации стандартной модели турбулентности. В последнее время выполнено много экспериментальных и теоретических исследований, связанных с разработкой промышленных установок, применяемых для очистки запыленных потоков [3-4].

Цель настоящего исследования – изучить аэродинамику запыленного потока в золоуловителях и определить эффективность ЦЗУ и ЛЗУ для разных конструкций.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В работе изучены 2 модели золоуловителей. Первая модель центробежного золоуловителя показана на рисунке 1 [2]. Корпус уловителя 1 имел сечение 300×600 мм, высоту – 600 мм. К верхней части корпуса уловителя, имеющей входное окно 184×200 мм, крепился горизонтальный входной участок 2. Для улучшения аэродинамики потока и улавливания частиц применялись «закручиватели» потока (рисунок 2) внутри корпуса вокруг труб в виде

направляющих пластин. Длина дуги $L \approx 130$ мм. Высота закручивателей потока была меньше высоты корпуса уловителя на высоту входного окна (200 мм). Закручиватели потока крепились в нескольких точках к корпусу уловителя.

Вторая модель – модель лабиринтного золоуловителя (рис. 3, 4) высотой 40 мм состояла из двух извилистых каналов 1, образованных пластинами 2 в форме полуокружностей. Входные 3 и выходные 4 щели образовывались с помощью перегородок 5. Перегородки 5 представляли собой пластины, один конец которых загнут с радиусом кривизны $r = 10$ мм. Пластины 2 и перегородки 5 закреплялись между двумя пластинами из оргстекла. Вдоль канала улавливающие карманы 6 изолировались перегородками 7 [2].

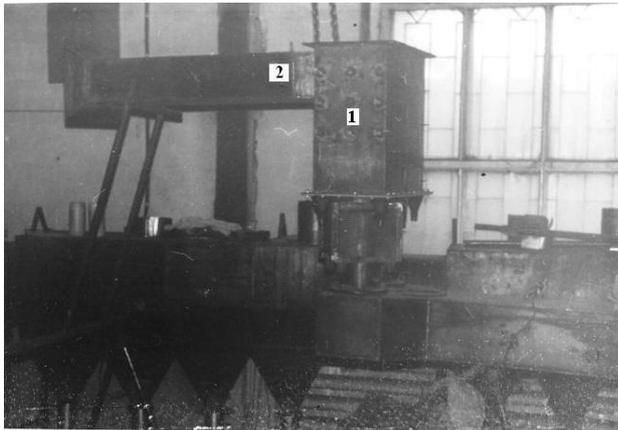


Рисунок 1 – Модель ЦЗУ (экспериментальное оборудование)

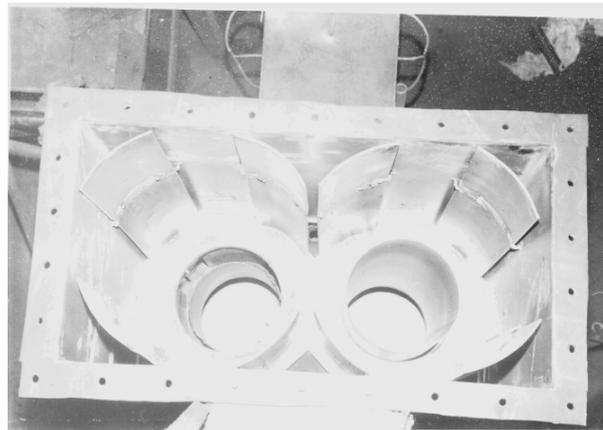


Рисунок 2 – Внутри ЦЗУ (закручиватели и трубы)

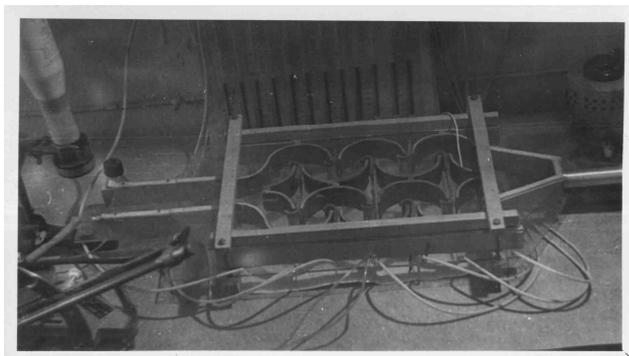


Рисунок 3 – Модель ЛЗУ (экспериментальное оборудование)

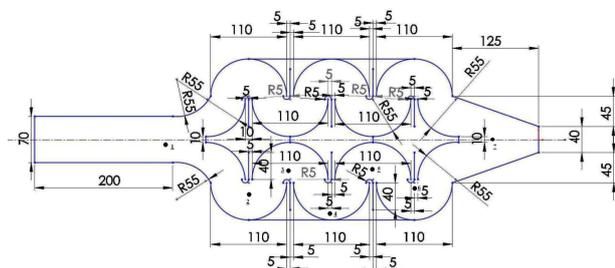


Рисунок 4 – Схема модели ЛЗУ

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для рассматриваемых несжимаемых потоков жидкости в декартовой системе координата уравнения Навье-Стокса газового потока, осредненные по Рейнольдсу, имеют вид [6]:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \bar{\rho} u_j}{\partial x_j} = 0; \quad \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j u_i) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u_i'' u_j'')$$

где $\bar{\tau}_{ij}$ – напряжение Рейнольдса;

t – время;

\bar{p} – давление;

$\bar{\rho}$ – плотность, $\bar{\rho} = \bar{p}/RT$;

x_i – декартова координата ($i = 1, 2, 3$), (x, y, z) соответственно;

u_i – компонента скорости жидкости в направлении x_i , (u, v, w) соответственно;

R – универсальная газовая постоянная,

T – температура.

Для описания турбулентности течения использовались 2 разные модели и, сравнением с экспериментальными результатами, выбиралась более точная модель.

Первая модель турбулентности – модель RNG k - ε , которая имеет вид [7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \bar{u}_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \mu_t (P + P_B) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \bar{u}_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = \left[\begin{array}{l} C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t P - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B \\ - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \rho \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \end{array} \right]; \quad (2)$$

где $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$;

σ – турбулентное число Прандтля;

значения коэффициентов в уравнениях (1)-(2) приведены в [7].

Вторая модель турбулентности – стандартная k - ε модель, имеет вид [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \mu_t (P + P_B) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \mu_t P_{NL}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = \left[\begin{array}{l} C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t P - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B \\ - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_{NL} \end{array} \right]; \quad (4)$$

$$P = S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}; \quad P_B = -\frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_j}; \quad P_{NL} = -\frac{\rho}{\mu_t} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \left[P - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right]. \quad (5)$$

Значения коэффициентов в уравнениях (3)-(5) приведены в [5].

Движение частиц, взвешенных в турбулентном потоке газа, могут описываться в рамках стохастического лагранжевого подхода [1]. При этом уравнения сохранения для движения твердых частиц в турбулентном газовом потоке имеет вид:

$$m_p \frac{d\bar{u}_p}{dt} = \bar{F}_{pr} + \bar{F}_p + \bar{F}_{am} + \bar{F}_g, \quad (6)$$

где $\bar{F}_{pr} = \frac{1}{2} C_D \rho A_p |\bar{u} - \bar{u}_p| (\bar{u} - \bar{u}_p)$;

C_D – коэффициент сопротивления частицы, в случае несжимаемого потока является функцией числа Рейнольдса [1]

$$C_D = \begin{cases} 24 / \text{Re}_p & \text{Re}_p \leq 1 \\ 24(1 + 0,15 \text{Re}_p^{0,687}) / \text{Re}_p & 1 < \text{Re}_p \leq 10^3; \\ 0,44 & \text{Re}_p > 10^3 \end{cases}$$

$$\text{Re}_p = \frac{d_p |\bar{u} - \bar{u}_p|}{\nu};$$

d_p, u_p – диаметр и скорость частицы;

u – скорость газовой фазы;

ρ – плотность несущей среды;

$|\vec{u} - \vec{u}_p|$ – модуль относительной скорости частицы, в декартовой системе координат;

$$\vec{F}_p = -V_p \nabla p;$$

V_p – объем частиц;

∇p – градиент давления в жидкости;

$$\vec{F}_{am} = -C_{am} \rho V_p \lambda \frac{d(\vec{u}_p - \vec{u})}{dt};$$

$$\lambda = \rho / \rho_p;$$

$C_{am} - \text{const};$

$$\vec{F}_g = m_p \vec{g} = \rho_p \frac{\pi}{6} d^3 \vec{g} - \text{сила тяжести,}$$

\vec{g} – вектор тяжести ускорения.

В работе рассматривались 2 различные конструкции золоуловителей:

1. ЦЗУ (рис. 5-7): ЦЗУ с тангенциальным входом без закручивателей, с закручивателями высотой 400 мм, и с закручивателями высотой 600 мм для разных высот труб (100 мм, 200 мм и 300 мм);

2. ЛЗУ (рис. 8-10):

а) ЛЗУ без перегородок, с открытыми щелями и с закрытыми щелями для разных входных скоростей (4 м/с, 6 м/с, 8 м/с и 10 м/с);

б) ЛЗУ с открытыми щелями для разных высот ЛЗУ (40 мм, 60 мм, 80 мм и 100 мм) при постоянной ширине ЛЗУ и для разных входных скоростей (6 м/с и 10 м/с).

Эффективность улавливания дисперсного материала в эксперименте определялась весовым методом с помощью ситового анализа: $\varepsilon = (M_{\text{ул}} / M_0) \cdot 100\%$, где $M_{\text{ул}}$ – масса уловленных частиц, M_0 – масса подаваемых на входе частиц.

Проведение вычислительного эксперимента в работе базируется на использовании метода контрольных объемов (F.V.) и SIMPLE алгоритма (STAR-CD4.06/CD-adapco). Система автоматизированного проектирования (программа SolidWorks 2011) использовалась для построения расчетных сеток для моделей конфигураций. Уравнение движения частиц (7) в несущем газовом потоке решается с использованием численной схемы Рунге-Кутты 2-го порядка точности.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Для расчета турбулентных течений в исследуемых геометрических областях используются естественные граничные условия: на стенке – «закон стенки», мягкие граничные условия на выходе из канала и соответствующие значения для всех переменных на входе в канал. Для частиц использовался закон упругого соударения со стенками канала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из важных аспектов численного моделирования является сравнение результатов вычислений с данными эксперимента. На рисунках 11 и 12 приведены численные и экспериментальные значения скорости (U_x) в ЦЗУ при ($X = -90, Y = 250$) и скорости (U_x) при ($X = -90, Y = 500$). На рисунке 13 приведены численные и экспериментальные значения перепада давления между выходными и входными щелями карманов. Совпадение полученных экспериментальных и рассчитанных значений свидетельствует об адекватности используемой в работе теоретической модели.

Результаты, приведенные на рисунках 11 и 12, свидетельствуют, что RNG k - ε модель является более точной и надежной для турбулентных течений, чем стандартная k - ε моделью.

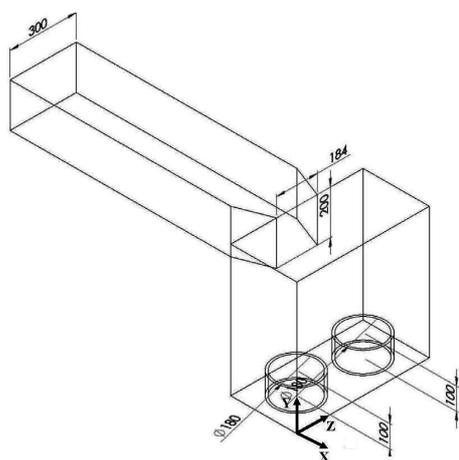


Рисунок 5 – ЦЗУ без закручивателей
(высота труб 100 мм)

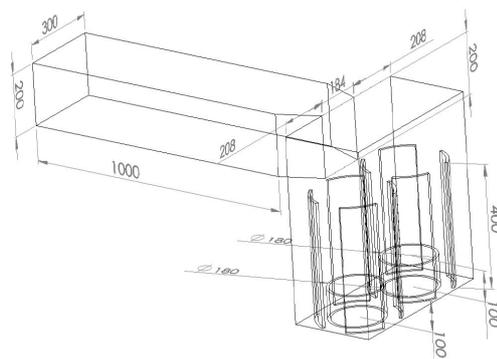


Рисунок 6 – ЦЗУ с закручивателями 400 мм
(высота труб 100 мм)

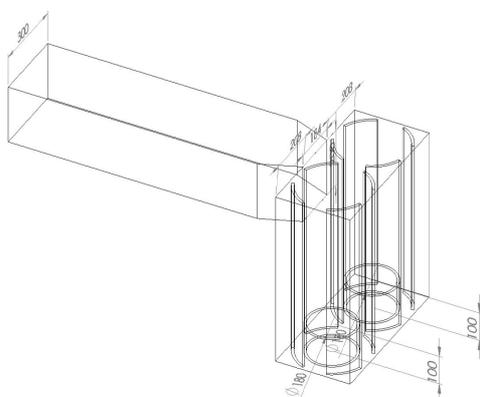


Рисунок 7 – ЦЗУ с закручивателями 600 мм
(высота труб 100 мм)

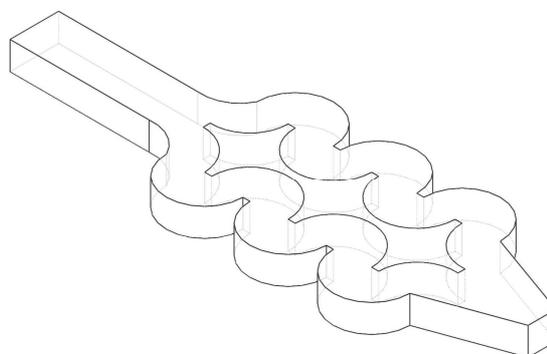


Рисунок 8 – ЛЗУ (высота 40 мм)
(без перегородок)

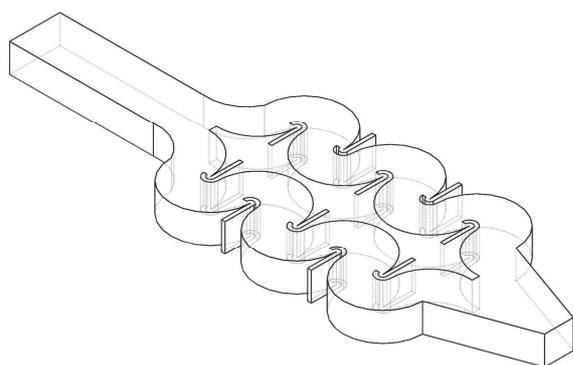


Рисунок 9 – ЛЗУ (высота 40 мм)
(с закрытыми щелями)

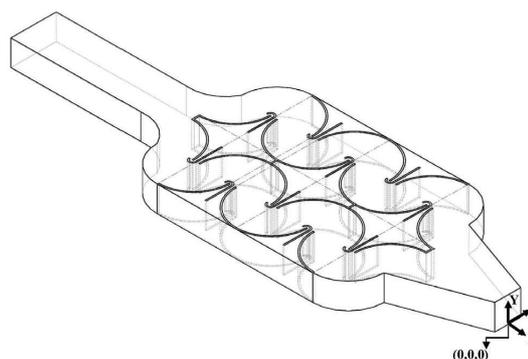


Рисунок 10 – ЛЗУ (высота 40 мм)
(с открытыми щелями)

Некоторые результаты расчетов приведены на рисунках 14 и 15. Подробная картина полей скорости в характерных областях ЦЗУ и траекторий частиц качественно не противоречит ожидаемой картине течения и служит для расчета эффективности золоулавливания.

На рисунке 16 приведены зависимости эффективности ЦЗУ для разных высот закручивателей потока. Из расчета следует, что эффективность ЦЗУ с закручивателями 600 мм больше чем эффективность ЦЗУ с закручивателями 400 мм и без них. Следовательно, применение закручивателей, в общем, повышает эффективность золоулавливания, а увеличение

заглубления выхлопных труб приводит как к увеличению ϵ , так и к уменьшению ϵ для ЦЗУ с закручивателями 400 мм. Эти результаты позволяют выбрать оптимальную конструкцию ЦЗУ.

На рисунке 17 приведены зависимости эффективности ЛЗУ от входной скорости. При этом получено, что эффективность ЛЗУ с открытыми щелями больше, чем эффективность ЛЗУ с закрытыми щелями и без перегородок. Отсюда видно, что рециркуляция части потока через входные и выходные щели, образованные перегородками, играют существенную роль в улавливании частиц. Эффективность ЛЗУ увеличивается с повышением скорости, т.к. траектории движения частиц смещаются к стенке с повышением скорости, что способствует их лучшей сепарации. Влияние высоты каналов на эффективность ЛЗУ при их постоянной ширине приведены на рисунке 18. Эффективность улавливания ЛЗУ снижается с ростом высоты каналов. На рисунках 19 и 20 показаны траектории частиц в ЦЗУ и в ЛЗУ, соответственно.

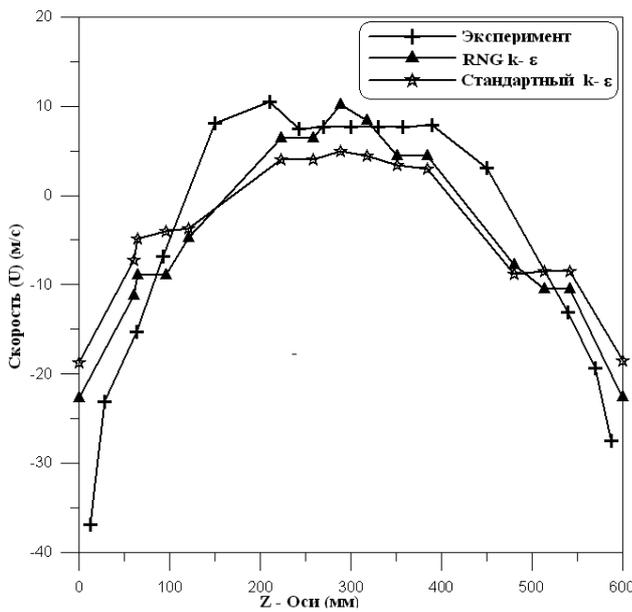


Рисунок 11 – Сравнение скорости (U_x) при ($X = -90, Y = 250$)

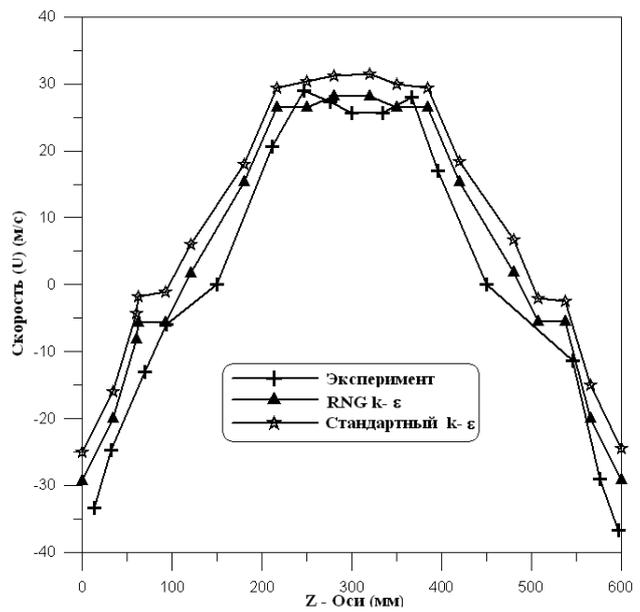


Рисунок 12 – Сравнение скорости (U_x) при ($X = -90, Y = 500$)

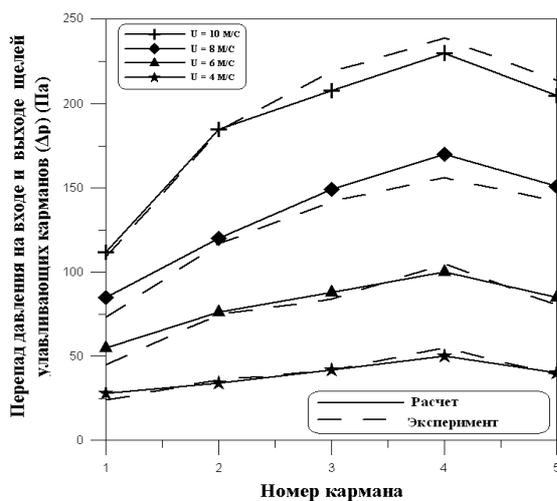


Рисунок 13 – Сравнение перепада давления на входе и выходе щелей карманов

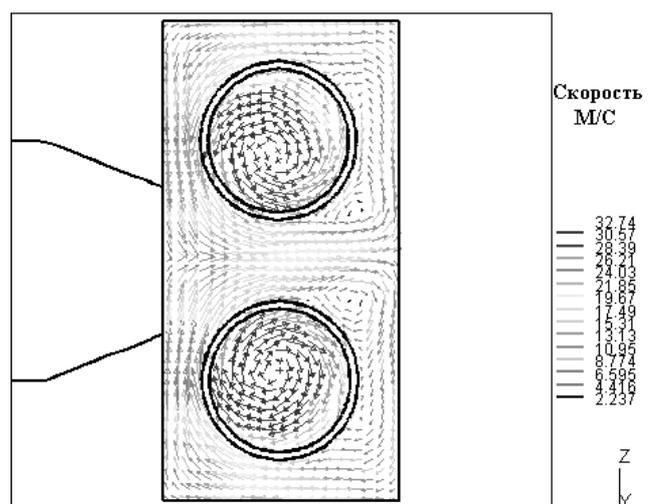


Рисунок 14 – Поля скорости ЦЗУ без закручивателей (высота труб 100 мм)

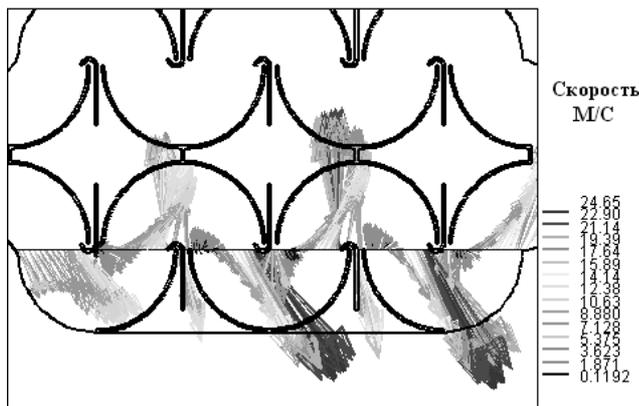


Рисунок 15 – Поля скорости (входная скорость = 6 м/с)

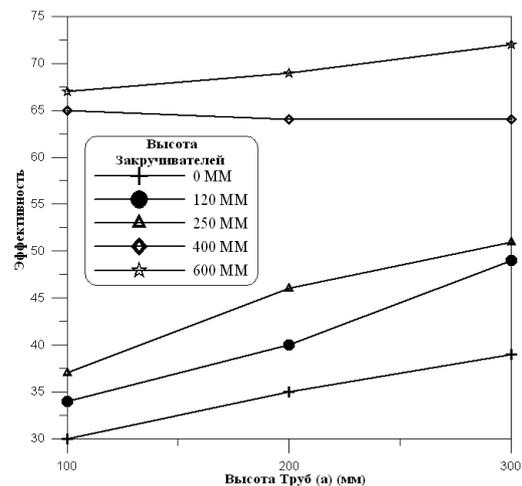


Рисунок 16 – Эффективность ЦЗУ для разных высот заглибления выхлопных труб

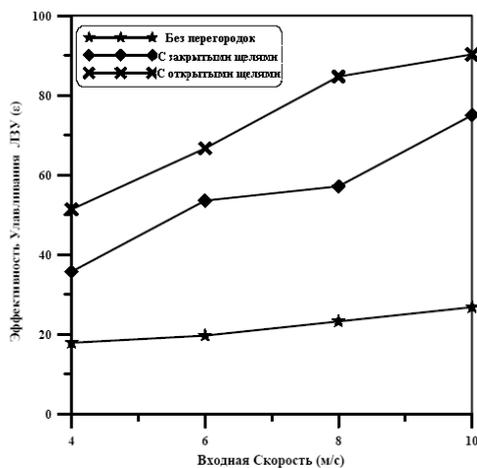


Рисунок 17 – Эффективность ЛЗУ для разных входных скоростей

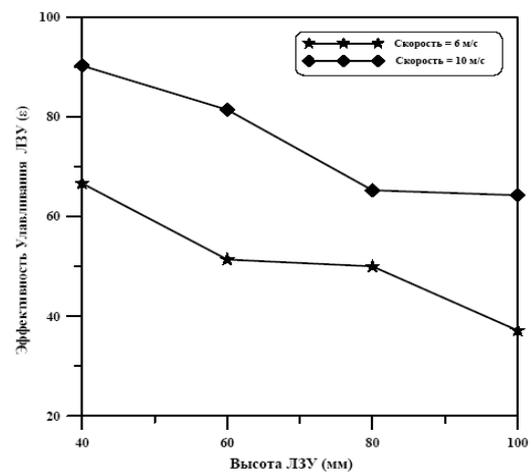


Рисунок 18 – Эффективность ЛЗУ для разной высоты каналов

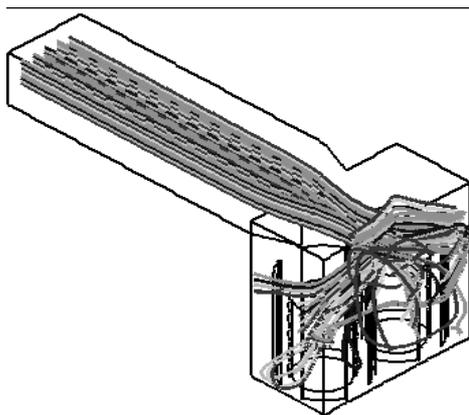


Рисунок 19 – Траектории частиц в ЦЗ с закручивателями 400 мм (высота труб 300 мм)

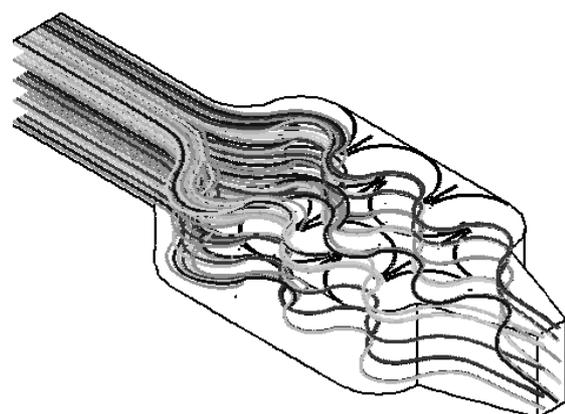


Рисунок 20 – Траектории частиц в ЛЗУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе экспериментально и теоретически изучено влияние закручивателя и высоты труб на аэродинамику и эффективность улавливания ЦЗУ, и изучено влияние входной скорости и высоты лабиринтного золоуловителя на аэродинамику и эффективность улавливания ЛЗУ. Результаты, приведенные выше, подтверждают что:

1. Эффективность ЦЗУ повышается с увеличением высоты закручивателей.
2. Наличие рециркуляционных щелей повышает эффективность ЛЗУ.
3. Эффективность ЛЗУ снижается с увеличением высоты ЛЗУ при постоянной ширине каналов ЛЗУ.
4. Рециркуляция части запыленного потока через улавливающие карманы, образованные перегородками значительно повышает эффективность ЛЗУ.

Дополнительный параметр у RNG k - ϵ модели, учитывающий циркуляцию турбулентности, улучшает точность расчета течений с интенсивной закруткой потока, что особенно актуально для золоуловителей.

Примененная методика исследования процессов сепарации частиц в ЛЗУ и в ЦЗУ показала свою работоспособность и может быть использована для аналогичных конструкций золоуловителей после соответствующего выбора модели турбулентности, связанной с особенностями течения запыленных потоков в извилистых каналах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вараксин, А.Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами [Текст] / А.Ю. Вараксин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 192 с. – ISBN 5-9221-0320-2.
2. Кисляк, С.М. Разработка уловителей и систем возврата уноса в котлах с низкотемпературным кипящим слоем [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Кисляк Сергей Марксинович. – Барнаул, 2004. – 184 с.
3. Темникова, Е. Ю., Исследование эффективности пылеулавливания в циклоне с рельефными поверхностями [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Темникова Елена Юрьевна. – Кемерово, 2010. – 175 с.
4. Bhasker, C. Flow simulation in industrial cyclone separator [Text] / C. Bhasker // Advances in Engineering Software. – 2010. – Vol. 41. – P. 220-228.
5. El Tahry, S.H. k - ϵ equation for compressible reciprocating engine flows [Text] / S.H. El Tahry // AIAA J. Energy. – 1983. – Vol. 7. – P. 345-353.
6. Warsi, Z.V.A. Conservation form of the Navier-Stokes equations in general no steady coordinates [Text] / Z.V.A. Warsi // AIAA Journal. – 1981. – Vol. 19. – P. 240-242.
7. Yakhot, V. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique [Text] / V. Yakhot [ets.] // Phys. Fluids. – 1992. – Vol. 7. – P. 1510-1520.

Алтухов Юрий Александрович

Алтайская государственная педагогическая академия, г. Барнаул
 Доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретических основ информатики,
 E-mail: yuri_altukhov@mail.ru

Кисляк Сергей Марксинович

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул
 Доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», кандидат технических наук
 E-mail: ksm58@rambler.ru

Аль Замили Али Мирали Джасим

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул
 Аспирант кафедры «Высшая математика»
 E-mail: alimeer2004@yahoo.com

Yu.A. ALTUXOV, S.M. KISLYAK, AL` ZAMILI ALI MIRALI DZHASIM

NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT FLOW IN DIFFERENT TYPES OF ASH REMOVAL

The article presents experimental and theoretical studies of three dimensional turbulent flow of dusty gas in the ash removals (centrifugal type and labyrinthine type).

Numerical study based on three-dimensional Navier-Stokes equations, averaged by Reynolds theorem, and Lagrangian model used to describe the particle trajectory in ash removal (centrifugal type and labyrinthine type). Control volume method with the SIMPLE algorithm (STAR-CD/CD-

adapco) used as numerical techniques for solving the governing equations. Two different turbulence models used (k - ϵ model and RNG k - ϵ model).

The present research techniques showed that this technique can be used to evaluate the flow in the ash removal after choice appropriate turbulence model that used for described flow with strongly swirling flows.

Keywords: *ash removal, three-dimensional turbulent flow, control volume, dusty flow, Lagrangian model.*

BIBLIOGRAPHY

1. Varaksin, A.Yu. Turbulentny'e techeniya gaza s tvorydy'mi chasticami [Tekst] / A.Yu. Varaksin. – M.: FIZMATLIT, 2003. – 192 s. – ISBN 5-9221-0320-2.
2. Kislyak, S.M. Razrabotka ulovitelej i sistem vozvrata unosa v kotlax s nizkotemperaturny'm kipyashhim sloem [Tekst]: dis. ... kand. texn. nauk: 01.04.14 / Kislyak Sergej Marksinovich. – Barnaul, 2004. – 184 s.
3. Temnikova, E. Yu., Issledovanie e'ffektivnosti py'leulavlivaniya v ciklone s rel'efny'mi poverxnostyami [Tekst]: dis. ... kand. texn. nauk: 05.26.01 / Temnikova Elena Yur'evna. – Kemerovo, 2010. – 175 s.
4. Bhasker, C. Flow simulation in industrial cyclone separator [Text] / C. Bhasker // Advances in Engineering Software. – 2010. – Vol. 41. – P. 220-228.
5. El Tahry, S.H. k - ϵ equation for compressible reciprocating engine flows [Text] / S.H. El Tahry // AIAA J. Energy. – 1983. – Vol. 7. – P. 345-353.
6. Warsi, Z.V.A. Conservation form of the Navier-Stokes equations in general no steady coordinates [Text] / Z.V.A. Warsi // AIAA Journal. – 1981. – Vol. 19. – P. 240-242.
7. Yakhot, V. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique [Text] / V. Yakhot [ets.] // Phys. Fluids. – 1992. – Vol. 7. – P. 1510-1520.

Altuxov Yurij Aleksandrovich

Altai State Pedagogical University, Barnaul

Doctor of technical science, professor of department of the Theoretical Foundations of Computer Science

E-mail: yuri_altukhov@mail.ru

Kislyak Sergej Marksinovich

Altai State Technical University named after I.I Polzunov, Barnaul

Associate professor of department "Heat and Gas Supply and Ventilation"

E-mail: ksm58@rambler.ru

Al` Zamili Ali Mirali Dzhasim

Altai State Technical University named after I.I Polzunov, Barnaul

Postgraduate student of department "Higher Mathematics"

E-mail: alimeer2004@yahoo.com

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.01

К.А. АДИГАМОВ, Г.В. ЧЕРНЕНКО, А.В. ЗЕЛЕНЩИКОВ

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ШНЕКОВЫМ КОНВЕЙЕРОМ

Приведены результаты аналитических и экспериментальных исследований энергоемкости транспортирования материалов вертикальным шнековым конвейером. Показано, что оребрение внутренней поверхности кожуха существенно уменьшает удельные энергозатраты при транспортировании сыпучих материалов.

Ключевые слова: шнековый конвейер, ребро кожуха, энергоемкость транспортирования.

Шнековые конвейеры типовой конструкции обладают сравнительно высокой энергоемкостью транспортирования материалов и поэтому уменьшение энергозатрат на осуществление этого процесса является актуальной задачей. Одним из вариантов решения этой проблемы, применительно к шнековым конвейерам, является оребрение внутренней поверхности кожуха [1].

Энергоемкость транспортирования материалов можно оценить общими энергозатратами, например, величиной потребляемой мощности, необходимой для работы шнекового конвейера, и удельными энергозатратами, приходящимися на единицу веса или объема транспортируемого материала. Первый показатель позволяет правильно выбрать требуемый электродвигатель для привода вращения шнека, а второй характеризует степень энергопотребления в процессе транспортирования материалов и, чем меньше этот показатель, тем эффективнее работает шнековый конвейер.

Общие затраты мощности на транспортирование материала вертикальным шнековым конвейером можно определить из выражения:

$$P = P_{\Pi} + P_{\text{тр.ш}} + P_{\text{тр.к}}, \quad (1)$$

где P_{Π} – затраты мощности на подъем материала;

$P_{\text{тр.ш}}$ – затраты мощности на преодоление сил трения материала по шнеку;

$P_{\text{тр.к}}$ – затраты мощности на преодоление сил трения материала по кожуху.

Затраты мощности на подъем материала:

$$P_{\Pi} = G \cdot v_z, \quad (2)$$

где G – вес материала на шнеке;

v_z – осевая скорость перемещения частицы материала по шнеку.

Затраты мощности на преодоление сил трения материала по шнеку:

$$P_{\text{тр.ш}} = G \cos \alpha \cdot f_{\text{ш}} \cdot v_r = G \cos \alpha \cdot f_{\text{ш}} \cdot v_z / \sin \alpha = G \cdot f_{\text{ш}} \cdot v_z \cdot \operatorname{ctg} \alpha, \quad (3)$$

где v_r – относительная скорость перемещения материала по спирали шнека;

$f_{\text{ш}}$ – коэффициент трения материала по шнеку;

α – угол подъема спирали шнека.

Затраты мощности на преодоление сил трения материала по кожуху:

$$P_{\text{тр.к}} = \frac{G}{g} \cdot R(\omega_{\text{ш}} - \omega_{\text{м}})^2 \cdot f_{\text{к}} \cdot v_a = \frac{G}{g} \cdot R(\omega_{\text{ш}} - \omega_{\text{м}})^2 \cdot f_{\text{к}} \cdot v_z / \sin \beta, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения;

R – наружный радиус шнека;

$\omega_{ш}$ – угловая скорость шнека;

$\omega_{м}$ – угловая скорость транспортируемого материала;

$f_{к}$ – коэффициент трения материала по кожуху;

β – угол подъема винтовой линии, по которой движется материал;

v_a – абсолютная скорость перемещения материала.

Суммируя выражения (2)-(4), получим:

$$P = G \cdot v_z \left(1 + f_{ш} \cdot \text{ctg} \alpha + \frac{R(\omega_{ш} - \omega_{м})^2 \cdot f_{к}}{g \sin \beta} \right). \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что мощность, необходимая на транспортирование материала, зависит от конструктивных и режимных параметров шнекового конвейера (R , α , $\omega_{ш}$), веса материала, находящегося на шнеке G , осевой скорости его перемещения v_z , угловой скорости материала $\omega_{м}$, коэффициентов трения материала по шнеку $f_{ш}$ и кожуху $f_{к}$.

Разделив требуемую мощность на производительность шнекового конвейера, получим удельную энергоёмкость транспортирования материала:

$$\mathcal{E}_y = P/Q.$$

Анализ долевого участия составляющих, определяемых по формулам (2)-(4), показал, что в общих затратах мощности, необходимой на транспортирование материала вертикальным шнековым конвейером, основные затраты мощности привода приходятся на преодоление сил трения материала по кожуху, так как они превосходят затраты мощности на подъем материала шнеком в 30,15-90,45 раза и затраты мощности на преодоление сил трения по шнеку – в 72,9-125,6 раза.

Численный анализ, выполненный по выражению (5), показал, что при применении шнеков с углом подъема спирали в диапазоне (10-25 °) потребляемая мощность привода имеет близкую к линейной, зависимость от угловой скорости (частоты вращения) шнека (рис. 1).

Экспериментальные исследования по определению энергоёмкости транспортирования проводились с применением кожухов с гладкой внутренней поверхностью, а также были использованы двухзаходные оребренные кожухи с углом установки ребра 70 °, так как шнековый конвейер с таким кожухом развивал наибольшую производительность. В таблице 1 показаны результаты экспериментальных исследований при транспортировании сухого песка.

Данные, приведенные в таблице 1, показывают, что при применении как оребренного, так и гладкого кожуха, потребляемая мощность с повышением частоты вращения шнека увеличивается, что подтверждает теоретические расчеты, а удельная энергоёмкость уменьшается, причем рост потребляемой мощности происходит пропорционально увеличению частоты вращения, а удельная энергоёмкость наиболее интенсивно уменьшается

при частоте вращения шнека в диапазоне 100-200 мин⁻¹, а затем этот процесс замедляется.

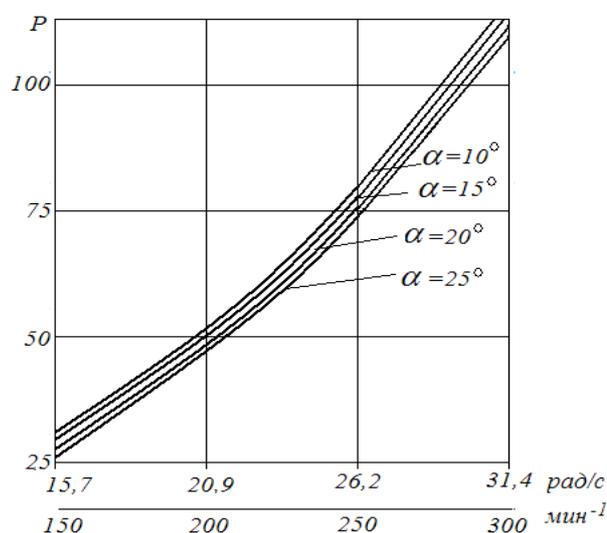


Рисунок 1 – Зависимости потребляемой мощности привода шнека от его угловой скорости (частоты вращения)

Сравнительный анализ приведенных данных показывает, что потребляемая мощность привода конвейера с оребренным кожухом оказалась больше, чем с гладким кожухом, в 1,13 раза по всему исследованному диапазону частоты вращения шнека, а удельная энергоемкость с оребренным кожухом уменьшилась в 1,34-1,54 раза.

Таблица 1 – Численные значения потребляемой мощности и удельной энергоемкости при транспортировании сухого песка

Конструкция кожуха	Потребляемая мощность, Вт				
	Удельная энергоемкость, Вт/см ³				
	Частота вращения шнека, мин ⁻¹				
	100	150	200	250	300
Оребренный с углом установки ребра 70 °	<u>154,0</u>	<u>162,8</u>	<u>176,0</u>	<u>189,2</u>	<u>204,6</u>
	1,03	0,65	0,39	0,29	0,26
Гладкий	–	<u>144,5</u>	<u>153,4</u>	<u>170,7</u>	<u>181,4</u>
		0,87	0,60	0,45	0,40

В таблице 2 приведены результаты экспериментальных исследований по определению энергоемкости при транспортировании гранулированного полиэтилена шнековым конвейером с кожухами аналогичной конструкции.

Таблица 2 – Численные значения потребляемой мощности и удельной энергоемкости при транспортировании гранулированного полиэтилена

Конструкция кожуха	Потребляемая мощность, Вт				
	Удельная энергоемкость, Вт/см ³				
	Частота вращения шнека, мин ⁻¹				
	100	150	200	250	300
Оребренный с углом установки ребра 70 °	<u>145,2</u>	<u>156,2</u>	<u>171,6</u>	<u>180,4</u>	<u>193,6</u>
	0,44	0,26	0,23	0,19	0,18
Гладкий	–	<u>138,6</u>	<u>149,6</u>	<u>162,8</u>	<u>171,6</u>
		0,60	0,48	0,38	0,37

Из данных, представленных в таблице 2, видно, что, как и в предыдущем случае, с повышением частоты вращения шнека потребляемая мощность увеличивается, а удельная энергоемкость транспортирования уменьшается.

Потребляемая мощность привода при применении оребренного кожуха выросла в 1,11-1,15 раза, а удельная энергоемкость оказалась меньше в 2,01-2,31 раза.

Сравнение результатов экспериментальных исследований по определению энергоемкости транспортирования материалов показывает, что при транспортировании песка численные значения потребляемой мощности и удельной энергоемкости оказались выше, чем при транспортировании гранулированного полиэтилена, что и следовало ожидать, так как объемный вес песка значительно больше, чем у полиэтилена.

На основании выполненных исследований можно заключить, что у шнекового конвейера с оребренным кожухом удельная энергоемкость транспортирования сыпучих материалов существенно (в 1,34-2,31 раза) меньше, чем у шнекового конвейера типовой конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адигамов, К.А. Способ повышения производительности вертикального шнекового конвейера [Текст] / К.А. Адигамов, Г.В. Черненко, В.М. Фетисов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. рег. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 81-82.

Адигамов Касьян Абдурахманович

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, г. Шахты
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика и конструирование машин»
Тел. (928) 101-54-70
E-mail: mail@sssu.ru

Черненко Геннадий Владимирович

Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного технического университета (НПИ), г. Шахты
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрификация и автоматизация производства»
Тел. (928) 198-02-76
E-mail: mail@sssu.ru

Зеленщиков Александр Владимирович

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, г. Шахты
Аспирант кафедры «Прикладная механика и конструирование машин»
Тел. (951) 534-94-58
E-mail: mail@sssu.ru

K.A. ADIGAMOV, G.V. CHERNENKO, A.V. ZELENSHHIKOV

POWER CONSUMPTION OF TRANSPORTATION OF MATERIALS BY THE VERTICAL SCREW CONVEYOR

Result analitical and experimental researches of power consumption of transportation of materials by the vertical screw conveyor are resulted. It is shown that edges on an internal surface of a casing essentially reduce specific power inputs at transportation of loose materials.

Keywords: screw conveyor, a casing edge, power consumption of transportation.

BIBLIOGRAPHY

1. Adigamov, K.A. Sposob povыsheniya proizvoditel'nosti vertikal'nogo shnekovogo konvejera [Tekst] / K.A. Adigamov, G.V. Chernenko, V.M. Fetisov // Izv. vuzov. Sev.-Kavk. reg. Texnicheskie nauki. – 2011. – № 4. – S. 81-82.

Adigamov Kas`yan Abduraxmanovich

South Russia State University of Economics and Service, Shakhty
Doctor of technical science, professor, head of department “Applied Mechanics and Design of Machines”
Tel. (928) 101-54-70
E-mail: mail@sssu.ru

Chernenko Gennadij Vladimirovich

Shakhtinsky Institute (branch) of the South Russian State Technical University (NPI), Shakhty
Candidate of technical science, associate professor of department “Electrification and Automation of Production”
Tel. (928) 198-02-76
E-mail: mail@sssu.ru

Zelenshhikov Aleksandr Vladimirovich

South Russia State University of Economics and Service, Shakhty
Postgraduate student of department “Applied Mechanics and Design of Machines”
Tel. (951) 534-94-58
E-mail: mail@sssu.ru

Ю.И. ФОКИН, В.В. РОГАЛЕВ

МАТЕРИАЛЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Отмечено, что в области мартенситного превращения во многих сплавах изменяются многие физические свойства. На основе материалов, обладающих эффектом памяти формы при мартенситном превращении, проанализированы возможности и перспективы их использования в двигателестроении на основе разработок кафедры «Тепловые двигатели» БГТУ.

Ключевые слова: мартенситное превращение, эффект памяти формы, двигатели внутреннего сгорания.

В процессе конструирования современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), обладающих высокой экономичностью и низкой токсичностью отработавших газов, применяются различные возможности управления рабочим процессом и системами двигателей с помощью механизмов и устройств, обеспечивающих изменение фаз газораспределения, степени сжатия, интенсивности охлаждения, закона топливоподачи и ряда других параметров в зависимости от режима работы двигателя. В большинстве случаев эти механизмы управляются электронными блоками, весьма сложными по устройству и требующими высокой квалификации обслуживающего персонала.

Протекающие в цилиндрах ДВС процессы сопровождаются существенным изменением температуры деталей, образующих камеру сгорания. При этом температура деталей зависит от режима работы двигателя, поэтому именно изменение температуры можно использовать для механического управления процессами, протекающими в ДВС, без применения электронных схем. Для решения этой задачи могут быть применены материалы, обладающие эффектом памяти формы (ЭПФ) [1], который обнаружен у многих сплавов, например у сплавов Ti-Ni, Fe-Ni, Cu-Mn и др.

Детали, изготовленной из материала, обладающего ЭПФ, при температуре выше температуры прямого мартенситного превращения приобретают определенную форму, а затем охлаждаются до температуры, обеспечивающей протекание обратного мартенситного превращения, и деформируются в этой температурной зоне до получения какой-либо другой формы. При последующем нагреве до температуры выше температуры мартенситного превращения деталь принимает исходную форму. При циклических изменениях температуры происходит многократное изменение формы. Температура мартенситного превращения различных сплавов изменяется в широких пределах, ЭПФ проявляется в различных диапазонах температур, поэтому для решения каждой конкретной задачи может быть подобран соответствующий сплав, обладающий эффектом памяти формы.

Восстановление заданной формы при мартенситном превращении происходит со значительной силой, что позволяет отказаться от промежуточных звеньев (усилителей) и использовать конструктивные элементы, выполненные из материалов с ЭПФ, непосредственно в качестве как датчиков, так и исполнительных механизмов систем управления.

Наиболее часто в качестве материала с ЭПФ используют никелид титана. Никелид титана с 55 % никеля имеет плотность $6,45 \text{ г/см}^3$, температуру плавления $1300 \text{ }^\circ\text{C}$, высокие коррозионную и жаростойкости. Его предел выносливости составляет $170...220 \text{ МПа}$, т.е. превосходит этот показатель для большинства сталей. При мартенситном превращении в никелиде титана изменяются многие физические свойства: электрическое сопротивление, внутреннее трение, термоэлектродвижущая сила, коэффициент Холла, скорость звука, теплоемкость, магнитная восприимчивость, теплопроводность. Изменение этих характеристик может быть использовано в системах управления и диагностирования.

Материалы, обладающие ЭПФ, могут широко использоваться при конструировании ДВС. Предлагаемые в настоящей работе технические решения разработаны на кафедре «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета. В этих конст-

рукциях реализованы свойства материалов с ЭПФ при их мартенситном превращении – изменение формы, генерирование внутренних напряжений, наличие значительного внутреннего трения, изменение электрического сопротивления.

Эффект изменения формы может быть использован, например, для интенсификации охлаждения деталей двигателя.

Для снижения образования накипи и повышения эффективности охлаждения гильз цилиндров ДВС целесообразно на охлаждаемой поверхности гильз устанавливать плотно прилегающие тонкостенные втулки, выполненные из материала с ЭПФ [2]. На непрогретом двигателе втулки имеют гладкую поверхность, которая обеспечивает низкий теплоотвод от гильз цилиндров. При прогреве втулки в ее материале происходит мартенситное превращение и на охлаждаемой поверхности втулки появляется рельеф в виде точечных выступов, что увеличивает поверхность охлаждения и способствует очистке втулки от накипи. При уменьшении нагрузки ДВС втулка охлаждается и в ее материале происходит обратное мартенситное превращение, в результате чего рельеф на наружной поверхности исчезает. Аналогичное техническое решение использовано и в головке цилиндров ДВС [3], в котором интенсивность охлаждения регулируется с помощью элементов, выполненных из материалов с ЭПФ.

Для более интенсивного охлаждения верхнего опорного бурта гильз цилиндров современных высокофорсированных ДВС в них выполняются сверленные каналы для протока охлаждающей жидкости. При установке в эти сверления вставок из материала с ЭПФ [4] можно увеличивать площадь охлаждения в номинальном режиме работы двигателя за счет появления на внутренней поверхности вставок продольных ребер, что существенно повышает площадь охлаждения и отвод теплоты от гильз цилиндров.

Применение материалов, обладающих ЭПФ, позволяет регулировать температуру составного поршня с центральной и кольцевой полостями охлаждения [5]. При запуске и работе непрогретого двигателя температура головки поршня и установленных в ней клапанов из материала с ЭПФ невелика и они находятся в закрытом положении, разделяя полости охлаждения на отдельные объемы. При высоких нагрузках двигателя поршень прогревается, клапаны открываются, и охлаждающее масло начинает циркулировать по центральной и кольцевой полостям. По такой схеме происходит охлаждение поршня.

Эффект изменения формы может быть использован также для улучшения смазки деталей двигателя.

Для смазки поверхностей трения ДВС предназначено устройство, содержащее вал 1, вращающийся в подшипнике 2 (рис. 1) [6]. Внутри вала по каналу 3 дополнительная смазка подается в зону трения. В зоне трения установлен короб 4, герметично соединенный с подшипником 2. Короб 4 установлен в емкости 5, наполненной смазкой, и закреплен на

поверхности подшипника 2. На коробе 4 закреплен нагнетательный клапан 6, соединенный с каналом 3. В коробе 4 установлен всасывающий клапан 10. Регулирование нагнетательного клапана 6 производится винтом 7 с фиксацией в заданном положении контргайкой 8. На внутренней поверхности короба 4 установлены пластины 11. Короб 4 и пластины выполнены из материала, обладающего ЭПФ. Для подачи смазки в емкость 5 предусмотрен трубопровод 12 с обратным клапаном 13.

Если узел трения не нагрет, то дополнительная смазка из трубопровода 12 через обратный клапан попа-

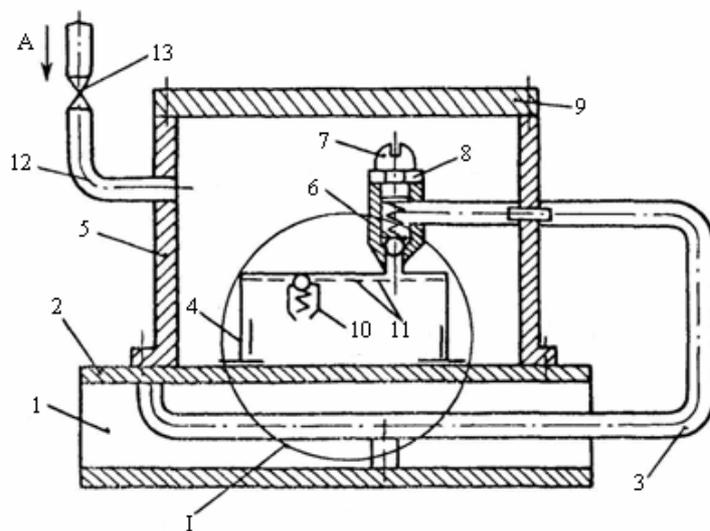


Рисунок 1 – Устройство для смазки поверхностей трения

дает в емкость 5. При этом пластины 11 прижаты к поверхности короба (рис. 1).

В начальной стадии нагрева узла трения нагревается короб 4 с пластинами 11, в которых происходит мартенситное превращение, и они изменяют свою форму, удаляясь свободными концами от поверхности короба 4 (рис. 2). Это улучшает теплоотдачу от короба к смазке и дает возможность подавать к поверхности трения уже подогретую смазку. При этом нагнетательный 6 и всасывающий 10 клапаны закрыты. При дальнейшем нагреве узла трения происходит мартенситное превращение в материале короба 4, на его боковой поверхности образуются гофры, что приводит к приближению верхней части короба 4 к поверхности трения и повышению давления в полости короба. В результате этого жидкость из короба 4 устремляется по стрелке Б (см. рис. 3) и открывает нагнетательный клапан, а затем по каналу 3 попадает на поверхность подшипника 2. После поступления смазки в канал 3 температура зоны трения уменьшается, что, в свою очередь, приводит к снижению температуры короба 4. В его материале происходит обратное мартенситное превращение, на его боковой поверхности гофры исчезают, что приводит к удалению верхней части короба 4 от поверхности трения и снижению давления в полости короба. При этом нагнетательный клапан 6 закрыт, но открывается всасывающий клапан 10. Это обеспечивает подачу смазки из емкости 5 в короб 4. Затем всасывающий клапан закрывается (рис. 2).

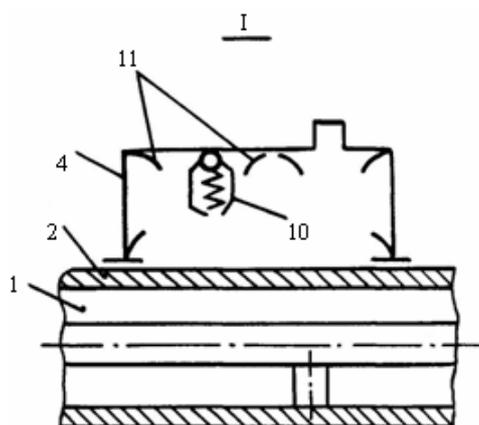


Рисунок 2 – Положение короба в начальной стадии нагрева узла трения

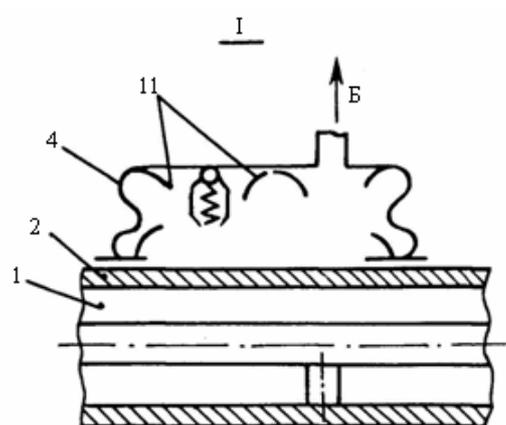


Рисунок 3 – Положение короба при дальнейшем нагреве узла трения

При дальнейшем снижении температуры узла трения обратное мартенситное превращение совершается в материале пластин 11, и они приближаются свободными концами к поверхности короба 4 (рис. 1), что снижает теплоотдачу от короба к смазке.

В случае повторного нагрева поверхности трения цикл работы устройства для смазки повторяется.

Кроме изменения формы при мартенситном превращении в процессе конструирования теплонапряженных деталей ДВС целесообразно использовать возможность генерирования механических внутренних напряжений при изменении температуры. Например, в поршне, имеющем головку 1 с канавками 2 под поршневые кольца, огневое днище 3, центральную 4 и периферийную 5 полости охлаждения, в теле головки у периферийной полости 5 установлена кольцевая вставка 6 в виде стакана или тарелки (рис. 4) [7]. Вставка выполнена из материала, обладающего ЭПФ, например из никелида титана. При запуске холодного ДВС возникающие в головке напряжения невелики и обусловлены преимущественно давлением газов в камере сгорания двигателя.

При нагреве двигателя в головке поршня резко возрастает термическое напряжение, имеющее на поверхности огневого днища характер сжатия. С ростом температуры во вставке 6 происходит мартенситное превращение, она увеличивает свой диаметр, вследствие чего

генерирует значительные напряжения растяжения. В результате этого суммарные напряжения на поверхности огневого днища 3 сокращаются. С выключением двигателя и охлаждением головки поршня во вставке 6 происходит обратное мартенситное превращение и вместо напряжений растяжения в ней генерируются напряжения сжатия. При этом величина остаточных напряжений растяжения на поверхности огневого днища значительно уменьшается, что способствует ликвидации причин появления трещин. При последующем запуске холодного двигателя цикл работы головки поршня повторяется.

Одной из важнейших проблем создания современных форсированных ДВС является устранение накопления остаточных термических напряжений в перемычках между клапанами головок цилиндров. В техническом решении [8] предлагается размещать кольцевую вставку из материала с ЭПФ на огневой поверхности головки цилиндра ДВС. Мартенситные превращения в материале кольцевой вставки при изменении температуры уменьшают сжимающие напряжения в перемычках клапанов и повышают надежность работы головки.

В техническом решении [9] использовано наличие высокого внутреннего трения материала с ЭПФ. При эксплуатации поршневых компрессионных колец ДВС отмечается высокий износ в зоне замка. Предложено в кольце у замка в выточках устанавливать вставки из материала с ЭПФ, например, из железоникелевого сплава. Этот материал имеет высокие демпфирующие свойства, уменьшает амплитуду колебаний поршневого кольца и уменьшает потери на трение.

Свойство никелида титана увеличивать электрическое сопротивление в интервале температур мартенситного превращения более чем в 5 раз [1] использовано в способе определения аварийного состояния теплонапряженных деталей машин, в том числе ДВС [10]. Для этого на огневой поверхности устанавливается активный датчик, выполненный из материала с ЭПФ. При каждом нагреве детали выше температуры мартенситного превращения материала датчика происходит постепенное увеличение электрического сопротивления датчика, и он автоматически регистрирует число теплосмен. Периодически на холодном двигателе определяют величину электрического сопротивления датчика, и при достижении предельно допустимого значения дальнейшая эксплуатация двигателя прекращается.

Применение материалов, обладающих ЭПФ, позволяет стабилизировать характеристики демпфирования крутильных колебаний ДВС. На рис. 5 представлена схема демпфера крутильных колебаний ДВС [11]. Демпфер содержит корпус 1, заполненный вязкой жидкостью, размещенный в нем маховик, состоящий из двух колец 2 и 3, между которыми установлен деформируемый элемент 4, выполненный из материала с ЭПФ в виде зафиксированного в осевом направлении гофра. Гофр имеет фланцы 5 и 6, прилегающие к обращенным к стенкам корпуса 1 торцам колец 2 и 3 маховика. К фланцам 5 и 6 прикреплены пластины 7.

При низкой температуре окружающей среды рабочая жидкость имеет высокую вязкость, кольца 2 и 3 сближены между собой. С повышением

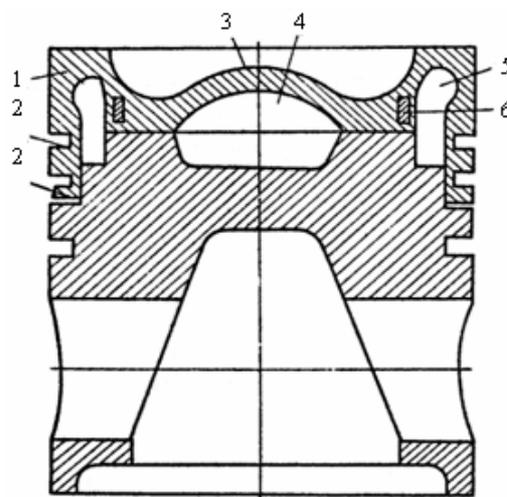


Рисунок 4 – Конструкция поршня

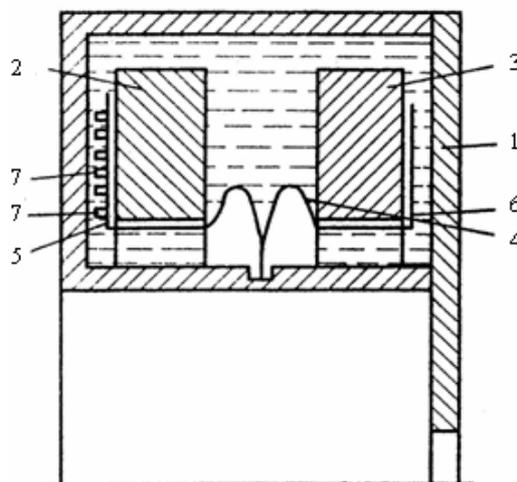


Рисунок 5 – Схема демпфера крутильных колебаний

ем температуры вязкость рабочей жидкости уменьшается. В деформируемом элементе 4 происходит мартенситное превращение, он разгибается, кольца 2 и 3 удаляются друг от друга, приближаясь к стенкам корпуса 1. Это увеличивает потери на трение колеблющегося маховика. При снижении температуры окружающей среды вязкость рабочей жидкости вновь увеличивается, в деформируемом элементе происходит обратное мартенситное превращение, под действием которого гофр восстанавливает свою первоначальную форму, а кольца 2 и 3 сближаются. Так обеспечивается стабилизация степени демпфирования крутильных колебаний ДВС при изменении температуры.

Эффект изменения формы может быть использован для решения самых разнообразных проблем, возникающих при проектировании теплонапряженных деталей двигателя.

Дизельный двигатель с высоким наддувом при высоких нагрузках должен работать при пониженной степени сжатия, а при пусковых и низких нагрузочных режимах иметь высокую степень сжатия. Это возможно при установке в головке цилиндров поршня, автоматически регулирующего степень сжатия, с помощью элементов, выполненные из материала с ЭПФ [12].

В современных ДВС с разделенными камерами сгорания основная камера и предкамера разделяются при положении поршня в верхней мертвой точке с помощью фигурного вытеснителя, расположенного на огневом днище поршня. Вытеснитель входит в горловину отверстия головки цилиндра и может быть гладким или иметь ребра. При выполнении вытеснителя из материала с ЭПФ в частичных режимах работы двигателя при низких температурах деталей камеры сгорания вытеснитель имеет винтовую форму, а на режимах, близких к номинальным, принимает цилиндрическую форму (рис. 6, 7) [13], что способствует улучшению сгорания топлива.

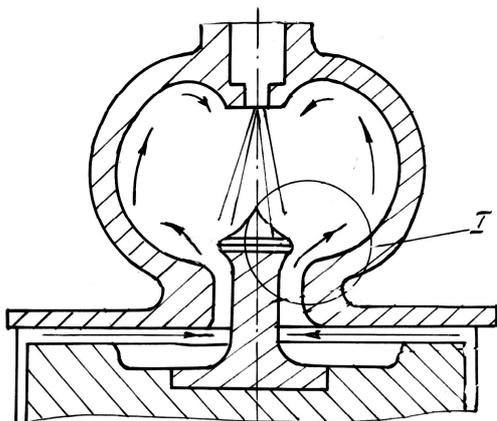


Рисунок 6 – Камера сгорания с гладким фигурным вытеснителем при высоких нагрузках двигателя

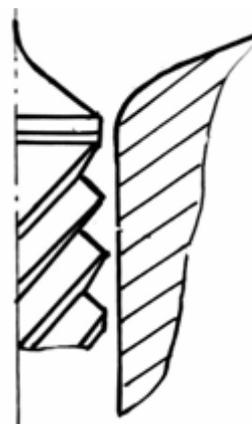


Рисунок 7 – Форма вытеснителя в частичных режимах работы двигателя

Для увеличения КПД турбин в агрегатах наддува ДВС широко применяется регулируемый сопловый аппарат. Механизмы поворота лопаток соплового аппарата турбины весьма сложны, особенно для малоразмерных турбин. Выполнение поворотных осей лопаток из материала с ЭПФ позволяет упростить решение этой задачи. Конструкция соплового аппарата упрощается, если лопатки закрепляются на поворотных осях, выполненных из материала, обладающего ЭПФ [14]. Поворот составных осей и сопловых лопаток происходит при изменении температуры рабочей среды, омывающей при работе турбины лопатки соплового аппарата и их поворотные составные оси.

Регулируемый сопловой аппарат турбины (рис. 8) содержит расположенные между корпусами 3 и 4 рабочие лопатки 1 ротора турбины и сопловые лопатки 2 с поворотными составными осями 9, закрепленные одним концом в корпусе 4, а другим концом соединенные с лопатками 2, причем поворотные составные оси состоят из нескольких секций 5, 6, 7, 8, чис-

ло которых для плавного регулирования углов установки лопаток выбирается возможно большим.

При увеличении нагрузки двигателя возрастает температура рабочей среды, омывающей сопловые лопатки 2 и их составные поворотные оси 9. В секциях 5, 6, 7, 8, выполненных из материалов, обладающих эффектом памяти формы, мартенситное превращение происходит в каждой секции отдельно при различной последовательно возрастающей температуре. На рис. 9 показано исходное положение сопловой лопатки 2 и ее положение при различных углах поворота составной поворотной оси 9. При снижении нагрузки турбины лопатки соплового аппарата поворачиваются в противоположном направлении вследствие уменьшения температуры рабочей среды и обратного мартенситного превращения в материалах секций составных поворотных осей.

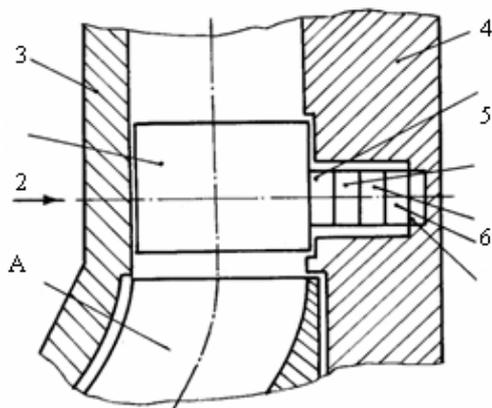


Рисунок 8 – Конструкция соплового аппарата турбины с лопатками, закрепленными на поворотных осях, выполненных из материала, обладающего эффектом памяти формы

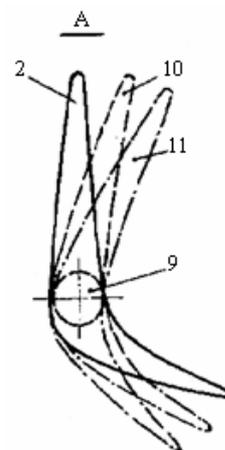


Рисунок 9 – Положение сопловой лопатки при различных углах поворота составной оси

Таким образом, использование ЭПФ в двигателестроении позволяет совершенствовать и упрощать конструкции деталей, узлов и систем двигателя, увеличивать их надежность, повышать технологичность их обслуживания и ремонта на основе нового подхода к проектированию – применения материалов, обладающих эффектом памяти формы. Этому благоприятствуют широкие исследования по поиску новых материалов с ЭПФ и определению их свойств. В частности, у сплавов Ni-Mn-Ga обнаружен магнитно-управляемый ЭПФ [15]. Сущность этого явления заключается в том, что у сплавов Ni-Mn-Ga температура мартенситного превращения изменяется под действием магнитного поля.

Использование эффекта памяти формы при проектировании теплонапряженных деталей двигателей внутреннего сгорания позволяет значительно расширить возможности конструктора, однако такой подход к конструированию носит инновационный характер и для его реализации необходимы инвестиции.

Таким образом, на кафедре «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета разработан и запатентован [16] ряд конструктивных решений в различных областях двигателестроения, позволяющих совершенствовать и упрощать конструкции узлов, деталей и систем двигателя, увеличивать их надежность на основе нового подхода к проектированию – применения материалов, обладающих эффектом памяти формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов, А.С. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении [Текст] / А.С. Тихонов, А.П. Герасимов, И.И. Прохорова. – М.: Машиностроение, 1981. – 80 с.
2. А. с. 1523698 СССР, МПК⁴ F02F1/10. Гильза цилиндров для ДВС с жидкостным охлаждением [Текст] / Ю.И. Фокин, В.И. Воробьев, И.А. Рак; заявл. 19.02.88; опубл. 23.11.89, Бюл. № 43.

3. А. с. 1332054 СССР, МПК⁴ F02F1/14. Головка цилиндров для ДВС [Текст] / Ю.И. Фокин, В.Г. Новиков, Г.Л. Васильев; заявл. 08.04.86; опубл. 23.08.87, Бюл. № 31.
4. А. с. 1437541 СССР, МПК⁴ F02F1/14. Втулка цилиндра для ДВС [Текст] / Ю.И. Фокин, В.Г. Новиков, И.В. Шубин; заявл. 17.02.87; опубл. 15.11.88, Бюл. № 42.
5. А. с. 1229405 СССР, МПК⁴ F02F3/22, F01F3/10. Составной охлажденный поршень для ДВС [Текст] / Ю.И. Фокин, В.И. Воробьев, С.В. Никитин; заявл. 20.11.84; опубл. 07.05.86, Бюл. № 17.
6. А. с. 1620770 СССР, МПК⁵ F16N7/08. Устройство для смазки поверхностей трения [Текст] / Ю.И. Фокин, А.А. Ипатов, С.В. Никитин, Г.З. Резников; заявл. 13.07.89; опубл. 15.01.91, Бюл. № 2.
7. А. с. 1364759 СССР, МПК⁴ F02F3/02. Поршень для ДВС [Текст] / Ю.И. Фокин, В.Г. Новиков, Г.Л. Васильев; заявл. 14.07.86; опубл. 07.01.88, Бюл. № 1.
8. А. с. 1332055 СССР, МПК⁴ F02F1/24. Головка цилиндров для ДВС [Текст] / В.Г. Новиков, Ю.И. Фокин, В.И. Воробьев; заявл. 28.04.86; опубл. 23.08.87, Бюл. № 31.
9. А. с. 1395846 СССР, МПК⁴ F02F5/00. Поршневое компрессионное кольцо для ДВС [Текст] / Ю.И. Фокин, В.И. Воробьев, В.Г. Новиков; заявл. 11.06.86; опубл. 15.05.88, Бюл. № 18.
10. Пат. 2296985 Российская Федерация, МПК⁷ G01N27/00. Способ определения аварийного состояния теплонпряженных деталей машин [Текст] / Рогалев В.В., Фокин Ю.И., Новиков В.Г.; патентообладатель ГОУ ВПО «Брянский государственный технический университет». – № 2005107513/28; заявл. 17.03.05; опубл. 10.04.07, Бюл. № 10.
11. А. с. 1696787 СССР, МПК⁵ F16F15/30. Демпфер крутильных колебаний [Текст] / Ю.И. Фокин, В.Г. Новиков, С.В. Никитин; заявл. 21.09.89; опубл. 07.12.91, Бюл. № 45.
12. А. с. 1193279 СССР, МПК⁴ F02B75/04, F02D15/04. ДВС с изменяемой степенью сжатия [Текст] / В.И. Воробьев, Ю.И. Фокин, А.Я. Шатов; заявл. 11.03.84; опубл. 23.11.85, Бюл. № 43.
13. Пат. 2227835 Российская Федерация, МПК⁷ F02B19/04. Двигатель внутреннего сгорания [Текст] / Рогалев В.В., Фокин Ю.И.; заявители и патентообладатели ГОУ ВПО «Брянский государственный технический университет», Рогалев Владимир Владимирович. – № 2002113969/062002113969/06; заявл. 28.05.02; опубл. 27.04.04, Бюл. № 12.
14. Пат. 2294439 Российская Федерация, МПК⁷ F01D17/12, F01D9/02. Регулируемый сопловый аппарат турбины [Текст] / Рогалев В.В., Фокин Ю.И.; патентообладатель ГОУ ВПО «Брянский государственный технический университет». – № 2005107512/06; заявл. 17.03.05; опубл. 27.02.07, Бюл. № 6.
15. Малыгин, Г.А. Моделирование эффекта магнитной памяти формы в пленках сплава Ni₂MnGa [Текст] / Г.А. Малыгин // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, вып. 2. – С. 136-139.
16. Рогалев, В.В. Применение материалов с эффектом памяти формы в двигателестроении [Текст] / В.В. Рогалев, Ю.И. Фокин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2005. – № 3. – С. 11-21.

Фокин Юрий Иосифович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Тепловые двигатели»
E-mail: dekanatfee@yandex.ru

Рогалев Владимир Владимирович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Тепловые двигатели»
E-mail: rogalvvv@tu-bryansk.ru

Yu.I. FOKIN, V.V. ROGALYOV

**THE MATERIALS WITH FORM MEMORY EFFECT IN
PROPULSION ENGINEERING**

It is noticed that in the martensite transformation area many alloys change their physical properties. On basis of the materials with form memory effect in the martensite transformation area, abilities and prospects of their using in propulsion engineering are analyzed, based on workings, developing in the "Heat engines" department of the Bryansk State Technical University.

Keywords: *martensite transformation, form memory effect, internal combustion engines.*

BIBLIOGRAPHY

1. Tixonov, A.S. *Primenenie e`ffekta pamyati formy' v sovremennom mashinostroenii* [Tekst] / A.S. Tixonov, A.P. Gerasimov, I.I. Proxorova. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 80 s.
2. A. s. 1523698 SSSR, MPK⁴ F02F1/10. *Gil`za cilindrov dlya DVS s zhidkostny'm oxlazhdeniem* [Tekst] / Yu.I. Fokin, V.I. Vorob`yov, I.A. Rak; zayavl. 19.02.88; opubl. 23.11.89, Byul. № 43.
3. A. s. 1332054 SSSR, MPK⁴ F02F1/14. *Golovka cilindrov dlya DVS* [Tekst] / Yu.I. Fokin, V.G. Novikov, G.L. Vasil`ev; zayavl. 08.04.86; opubl. 23.08.87, Byul. № 31.
4. A. s. 1437541 SSSR, MPK⁴ F02F1/14. *Vtulka cilindra dlya DVS* [Tekst] / Yu.I. Fokin, V.G. Novikov, I.V. Shubin; zayavl. 17.02.87; opubl. 15.11.88, Byul. № 42.
5. A. s. 1229405 SSSR, MPK⁴ F02F3/22, F01F3/10. *Sostavnoj oxlazhdyonny'j porshen` dlya DVS* [Tekst] / Yu.I. Fokin, V.I. Vorob`yov, S.V. Nikitin; zayavl. 20.11.84; opubl. 07.05.86, Byul. № 17.
6. A. s. 1620770 SSSR, MPK⁵ F16N7/08. *Ustrojstvo dlya smazki poverxnostej treniya* [Tekst] / Yu.I. Fokin, A.A. Ipatov, S.V. Nikitin, G.Z. Reznikov; zayavl. 13.07.89; opubl. 15.01.91, Byul. № 2.
7. A. s. 1364759 SSSR, MPK⁴ F02F3/02. *Porshen` dlya DVS* [Tekst] / Yu.I. Fokin, V.G. Novikov, G.L. Vasil`ev; zayavl. 14.07.86; opubl. 07.01.88, Byul. № 1.
8. A. s. 1332055 SSSR, MPK⁴ F02F1/24. *Golovka cilindrov dlya DVS* [Tekst] / V.G. Novikov, Yu.I. Fokin, V.I. Vorob`yov; zayavl. 28.04.86; opubl. 23.08.87, Byul. № 31.
9. A. s. 1395846 SSSR, MPK⁴ F02F5/00. *Porshnevoe kompressionnoe kol`co dlya DVS* [Tekst] / Yu.I. Fokin, V.I. Vorob`yov, V.G. Novikov; zayavl. 11.06.86; opubl. 15.05.88, Byul. № 18.
10. Pat. 2296985 Rossijskaya Federaciya, MPK⁷ G01N27/00. *Sposob opredeleniya avarijnogo sostoyaniya teplonapryazhyonny'x detalej mashin* [Tekst] / V.V. Rogalyov, Yu.I. Fokin, V.G. Novikov; patentoobladatel` GOU VPO «Bryanskij gosudarstvenny'j texnicheskij universitet». – № 2005107513/28; zayavl. 17.03.05; opubl. 10.04.07, Byul. № 10.
11. A. s. 1696787 SSSR, MPK⁵ F16F15/30. *Dempfer krutil`ny'x kolebanij* [Tekst] / Yu.I. Fokin, V.G. Novikov, S.V. Nikitin; zayavl. 21.09.89; opubl. 07.12.91, Byul. № 45.
12. A. s. 1193279 SSSR, MPK⁴ F02B75/04, F02D15/04. *DVS s izmenyaemoj stepen`yu szhatiya* [Tekst] / V.I. Vorob`yov, Yu.I. Fokin, A.Ya. Shatov; zayavl. 11.03.84; opubl. 23.11.85, Byul. № 43.
13. Pat. 2227835 Rossijskaya Federaciya, MPK⁷ F02V19/04. *Dvigatel` vnutrennego sgoraniya* [Tekst] / V.V. Rogalyov, Yu.I. Fokin; zayaviteli i patentoobladateli GOU VPO «Bryanskij gosudarstvenny'j texnicheskij universitet», Rogalyov Vladimir Vladimirovich. – № 2002113969/062002113969/06; zayavl. 28.05.02; opubl. 27.04.04, Byul. № 12.
14. Pat. 2294439 Rossijskaya Federaciya, MPK⁷ F01D17/12, F01D9/02. *Reguliruemy'j soplovy'j apparat turbiny'* [Tekst] / V.V. Rogalev, Yu.I. Fokin; patentoobladatel` GOU VPO «Bryanskij gosudarstvenny'j texnicheskij universitet». – № 2005107512/06; zayavl. 17.03.05; opubl. 27.02.07, Byul. № 6.
15. Maly`gin, G.A. *Modelirovanie e`ffekta magnitnoj pamyati formy' v plenkax splava Ni2MnGa* [Tekst] / G.A. Maly`gin // Zhurnal texnicheskoj fiziki. – 2007. – T. 77, vy'p. 2. – S. 136-139.
16. Rogalyov, V.V. *Primenenie materialov s e`ffektom pamyati formy' v dvigatelestroenii* [Tekst] / V.V. Rogalev, Yu.I. Fokin // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. – 2005. – № 3. – S. 11-21.

Fokin Yuriy Iosifovich

Bryansk State Technical University, Bryansk

Candidate of technical science, professor of department “Heat Engines”

E-mail: dekanatfee@yandex.ru

Rogalyov Vladimir Vladimirovich

Bryansk State Technical University, Bryansk

Candidate of technical science, head of department “Heat Engines”

E-mail: rogalvv@tu-bryansk.ru

А.Ю. ФОКИН

ПРИМЕНЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ О ЗАКОНЕ ПРОГРЕССИВНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПОРШНЕВЫХ ДВС

Рассмотрена история создания и совершенствования поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Подтверждена гипотеза о законе прогрессивной конструктивной эволюции технических объектов на примере совершенствования поршневых ДВС.

Ключевые слова: поршневые ДВС, прогрессивная эволюция, критерии эффективности, конструктивные изменения.

Уже в начале XX века человечество стало мощнейшей силой, изменяющей не только физический и химический состав атмосферы, но и саму геологию планеты. Новое состояние биосферы, измененной человеком, в работе Е. Ле-Руа 1927 года получило название ноосфера [1]. В связи с ускоряющимся ростом сложности и разнообразия техники в первой половине XX века количество специалистов, имеющих детальное и полное представление о технике и техносфере, неуклонно сокращалось. При этом сама техносфера, способная к саморазвитию, развивалась стихийно и была ограничена лишь ресурсами биосферы [2].

Таким образом, в XX веке появилась объективная потребность в создании интеллектуальных и других специальных средств повышения производительности и эффективности инженерно-технического творчества [3]. Вышеперечисленные причины уже вызвали новые направления работ, связанных с созданием интеллектуальных средств технического творчества. В 40-е – 60-е годы XX века получают распространение эвристические методы технического творчества: мозговая атака, сенектика, морфологический анализ и синтез, методы эвристических приемов типа алгоритма решения изобретательских задач, теории решения изобретательских задач, библиотек эвристик, функционально-стоимостный анализ и др. [4]

Позднее, в 70-е годы, в связи с развитием компьютерной техники развиваются новые средства: системы математического моделирования новых технических решений, системы синтеза новых решений на И-ИЛИ-графах, синтез новых принципов действия с помощью банков данных по физическим эффектам и пр.

Наряду с этим формируется новая наука, которую можно назвать технознанием, техниковедением или историей техники, а так же, по мнению А.И. Половинкина ее отдельная дисциплина «Теория и методы проектирования новой техники» [5].

Наука о законах техники только начинает формироваться. И первый этап, естественно, связан с формулированием и обоснованием гипотез о законах строения и развития техники. Сегодня нет пока достаточно обоснованных общепризнанных отдельных законов техники и нет еще даже в гипотезах полной замкнутой их системы. Создание такой системы, как и обоснование отдельных законов – одно из важнейших актуальных современных направлений фундаментальных исследований, относящихся к технознанию и общей теории проектирования. Это направление ждет своих энтузиастов-исследователей.

Однако в отличие от недавнего времени сегодня уже имеются теоретические и методические разработки по законам и закономерностям техники, которые представляют большой интерес для практического использования в инженерном творчестве. В первую очередь здесь имеются в виду разработки, изложенные в книгах Ю.С. Мелещенко, А.Ф. Каменева и А. И. Половинкина [4, 6, 7].

Гипотезы о законах техники и их обоснование наиболее полно на инженерном уровне изложены в работе А.И. Половинкина [7]. Рассмотрим конструктивную эволюцию поршневых ДВС.

Французский физик и инженер Дени Папен явился первым новатором, использовавшим принцип сжигания топлива непосредственно в цилиндре. В 1682 году он предложил по-

роховую машину прямого действия. Избыточное давление, вызванное вспышкой пороха в цилиндре, предполагалось использовать для подъема воды [8]. Таким образом, первый в мире изобретенный поршневой ДВС должен был работать на твердом топливе.

Через столетие, в 1794 году англичанин Р. Стрит проектирует двигатель на жидком топливе [8]. Топливо испаряется в самом цилиндре и смешивается с всасываемым в первой половине хода поршня воздухом. Затем, на середине хода поршня, смесь воспламеняется постоянно горящим запальником, и поршень перемещается далее под действием продуктов сгорания.

Уже в 1801 году французский инженер Ф. Лебон изобретает ДВС двойного действия, работающий на светильном газе [8, 9]. Рабочая смесь воспламенялась на 1/3 от верхней мертвой точки (ВМТ) уже электрическим запалом.

В 1815 году С. Браун разрабатывает конструкцию двигателя с охлаждением цилиндров. В 1823 году его двигатель был построен и стал первым в мире работающим ДВС [10].

В. Райт в 1833 году создает двигатель, в котором зажигание происходило в верхней мертвой точке, что существенно повысило эффективность его работы [8, 9]. По конструкции двигатель Райта был газовым двойного действия, с центробежным регулятором, изменяющим пропорцию газа в заряде. Зажигание осуществлялось с помощью наружных горелок, а для охлаждения цилиндра использовалась водяная рубашка. КПД этого двигателя так же оставался довольно низким.

В 1838 году английский инженер В. Барнет получает патент за создание двигателя с предварительным сжатием подаваемого газа и воздуха отдельными насосами [8, 9]. Окончательное сжатие смеси производилось в цилиндре двигателя, а зажигание осуществлялось в верхней мертвой точке с помощью пламени или раскаленной губчатой пластины. Как и предшественник, двигатель обладал низким КПД, а также некачественным газообменом и высокими нагрузками на кривошипно-шатунный механизм (КШМ).

По английскому патенту от 1842 года в двигателе, изобретенном Дрейком и работавшем на светильном газе, воспламенение горючей смеси производилось при помощи весьма практичного устройства – чугунной калильной трубки. Этот двигатель также был построен и экспонировался в 1847 году на выставке в США в Филадельфии [11].

Инженеры Барсанти и Маттойчи в 1854 году изобрели оригинальный по своей конструкции «атмосферный» двигатель [8]. В нем под действием сгораемой от электрической искры смеси светильного газа и воздуха поршень двигался вверх. Под поршнем образовывалось разрежение, под действием атмосферного давления он опускался вниз и с помощью зубчатой рейки вращал коленчатый вал. В 1857 году этот двигатель был построен.

Через несколько лет, в 1858 году французский инженер Дегран предложил отказаться от старой схемы сжатия рабочей смеси особыми насосами и сжимать ее в самом цилиндре непосредственно поршнем [8, 9].

Не все отмеченные выше изобретения были воплощены в реально действующих двигателях, однако работа изобретателей не была бесплодной. Впоследствии их идеи все же были реализованы.

В 1860 году французский механик Ж.Э. Ленуар создает первый практически пригодный двигатель, с появлением которого и начинается история развития ДВС. Этот двигатель работал без сжатия смеси. Всасывание происходило на половине хода поршня, после чего происходило воспламенение. По конструкции этот газовый двигатель имел горизонтальное расположение цилиндра и золотниковое газораспределение [9].

Кельнский предприниматель и изобретатель Н. Отто, ознакомившись с работой Ж.Э. Ленуара, экспериментально доказал, что зажигание нужно производить у верхней мертвой точки, при этом необходимо сжатие смеси. В 1864 году им была создана «атмосферная машина» – вертикальный двигатель с реечным зацеплением шестерни в одну сторону и отключением зацепления шариковой муфтой в другую [9, 11, 12].

КПД этого двигателя составлял 14-15 %, по сравнению с 4-5 % у существующих в то время ДВС. Это по достоинству было оценено, и на парижской Всемирной выставке 1867

года «атмосферная машина» Н. Отто получила золотую медаль. Но, несмотря на свои достоинства, этот двигатель производил неблагоприятное впечатление вследствие высокой шумности быстро движущегося поршня со штоком, своей громоздкости и дороговизны.

Н. Отто продолжил работу над усовершенствованием двигателей и в 1877 году запатентовал четырехтактный газовый горизонтальный крейцкопфный двигатель с клапанным газораспределением. Мощность двигателя составляла 4 л.с. при максимальном давлении сгорания 9 кг/см^2 и диаметре цилиндра 275 мм.

Из-за высокой стоимости газа в некоторых странах газовые двигатели не получили достаточного распространения, и поэтому фирмой Н. Отто был создан керосиновый двигатель [10]. Он был крейцкопфным с горизонтальным расположением цилиндров. В этом двигателе использовалось жидкостное термосифонное охлаждение и применялось центробежное дозирование топлива с зажиганием электрической искрой от индукционной катушки, кинематически связанной с распредвалом.

Одновременно с двигателями Н. Отто на промышленном рынке появляются четырехтактные двигатели русского изобретателя Е.А. Яковлева, оригинальность которых подтверждена привилегиями патентного ведомства России № 11 и № 12 за 1892 год. Производство этих двигателей началось в 1889 году на заводе Е.А. Яковлева в Петербурге [13]. От керосиновых двигателей Н. Отто российский двигатель отличался вертикальным расположением цилиндра и отсутствием крейцкопфа. Механизм газораспределения имел автоматический впускной клапан и механический привод выпускного. Смазка осуществлялась под давлением, охлаждение – термосифонное, карбюратор – испарительного типа, зажигание – от электрической свечи конструкции Е.А. Яковлева с двумя электродами. При этом существенным недостатком являлась высокая стоимость топлива – керосина.

В конце XIX века появилась новая отрасль промышленности – автомобилестроение. Толчок к ее развитию дали новые быстроходные карбюраторные двигатели, работавшие на легких сортах топлива. В 1882 году Г. Даймлер и Майбах не нашли поддержки у руководителей фирмы «Отто-Дейц» и решили создать свою собственную фирму по разработке транспортных двигателей. Такой двигатель был разработан, и в 1885 году Г. Даймлер получил на него патент [11].

Именно на базе подобных двигателей были созданы первые в мире моторный экипаж (автомобиль), моторный велосипед (мотоцикл) и моторный вагон [9]. После этого в течение короткого времени многие другие конструкторы (Маркус, Опель, Бенц, Е.А. Яковлев и др.) запатентовали автомобили. При этом на первенство в создании автомобиля претендовало 416 изобретателей.

Наиболее распространенным и популярным двигателем конца XIX – начала XX века была т.н. «нефтянка» – двигатель с принудительным воспламенением, работающий по циклу Отто. При этом запуск двигателя был возможен как вручную, после прогрева лампы калоризатора, так и с помощью сжатого воздуха. Калоризаторные тихоходные двигатели, работающие на тяжелых сортах топлива, стали предтечей к дизелестроению [13].

Дальнейшее совершенствование двигателей внутреннего сгорания во многом связано с именем немецкого инженера Рудольфа Дизеля [14, 15, 16]. Его знаменитая работа «Теория и конструкция рационального теплового двигателя для замены паровой машины и ныне известных двигателей», опубликованная в 1893 году, подвигла Аугсбургский завод общества MAN при непосредственном участии самого изобретателя за четыре года опытов придать его идее практическую форму, т.е. пригодный для эксплуатации двигатель [17].

1 мая 1895 года новый вариант двигателя эффективно работал на холостых оборотах, а уже 16 июня этого же года под нагрузкой обеспечил эффективный КПД 26 %. Через два года, в феврале 1897 года, были проведены официальные испытания двигателя с воспламенением от сжатия, при этом керосин распылялся в камере сгорания с помощью компрессора. Это был одноцилиндровый четырехтактный крейцкопфный двигатель вертикального типа при эффективном КПД 24 %, работающий на керосине. Расход топлива у этого двигателя составлял всего 238 г/э.л.с.ч и был почти в два раза меньше, чем у любого двигателя того вре-

мени [11, 17]. При всех достоинствах данный двигатель обладал слишком громоздкой системой распыла топлива.

Идея двигателя с бескомпрессорным распылом топлива принадлежит русскому изобретателю Г. Тринклеру. Будучи студентом Петербургского технологического института, он в 1898 году получил патент на спроектированный им двигатель и построил образец на Путиловском заводе [12, 18, 19].

В 1909 году была практически решена проблема реверса судовых двигателей. Фирма Зульцер освоила производство двухтактных судовых реверсивных двигателей, а на заводе «Людвиг Нобель» в Петербурге изготовлен четырехтактный реверсивный дизель для подводной лодки «Минога». [15, 17]. Двигатель фирмы Зульцер обладал низким КПД и низкой удельной мощностью.

Идея турбонагнетателя на выхлопных газах, став известной миру в 1905 году благодаря швейцарскому инженеру Альфреду Бюхи, на первых порах особого интереса не вызвала. Но уже к 1920 году небольшие турбонагнетатели использовались во французской и американской авиации. Применение же их для тяжелых условий работы было еще экономически нецелесообразно. Но все изменилось в 1923 году, когда в Германии был опубликован отчет об испытаниях низконапорного наддува четырехтактных дизелей, а на судовой верфи «Вулкан» были заложены два больших пассажирских судна, на каждом из которых устанавливалось по два 4-тактных 10-цилиндровых двигателя MAN с турбонагнетателями Альфреда Бюхи [20].

Продолжалась работа над повышением качества смесеобразования бензиновых двигателей. В 1916 году русские конструкторы А.А. Микулин и Б.С. Стечкин создают свой первый мотор АМБС-1 с системой впрыска. При всех своих достоинствах и новых конструкторских решениях, двигатель был изготовлен из некачественных материалов и, проработав всего несколько минут, вышел из строя. События 1917 года и прекращение финансирования остановили доработку этого двигателя, хотя опыт, полученный при его разработке, пригодился авторам изобретения, ставшими впоследствии одними из ведущих конструкторов двигателей в СССР [6, 21, 22].

В Германии к 1936 году фирма «Robert Bosch» создала первые комплекты топливной аппаратуры для непосредственного впрыска бензина в цилиндры. Уже через год их начали ставить на авиационные двигатели. В СССР первые двигатели с впрыском бензина серийно стали выпускаться только с 1942 года, а в США этот процесс затянулся до конца войны [24].

В 1923 году Швейцарская компания «Swiss Locomotive and Machine Works» (SLM) произвела испытания двухтактного дизеля также с использованием турбонагнетателя. Но лишь последовательное оттачивание технологии турбонаддува к началу 1950-х годов позволило широко применять данное новшество на двухтактных двигателях. В октябре 1952 года на воду был спущен танкер «Dorthe Maersk» водоизмещением 18 000 тонн, построенный на датской судовой верфи «A.P. Moller». Это было первое судно, имеющее двухтактный 6-цилиндровый дизельный двигатель B&W с турбонаддувом. Два турбонагнетателя VTR630, расположенные сбоку двигателя, позволили поднять мощность на его валу с 5530 до 8000 л.с [25].

Закономерным этапом в развитии агрегатов наддува стало появление в 1980 году двухступенчатого наддува дизельных двигателей, что привело к значительному повышению удельной мощности. Но при этом КПД двигателей на частичных режимах работы оставался низким [26, 27].

Работы по снижению расхода топлива и повышению экономичности двигателей отключением цилиндров на частичных режимах начались в СССР в автомобильной лаборатории, возглавляемой академиком Е.А. Чудаковым, еще в середине 30-х годов. В теории этот способ помог бы снизить расход топлива на частичных режимах работы бензиновым поршневым двигателем до 25 %, а дизелем – до 15 %. Но практическое внедрение данной системы стало возможно лишь с развитием электроники [28, 29, 30].

Только в начале 80-х годов XX века в США подобную систему впервые применил на своих автомобильных двигателях «Cadillac», а в середине 90-х концерн «General Motors»

проектирует новые восьмицилиндровые моторы с системой отключения цилиндров Displacement-on-Demand («рабочий объем по требованию»). В Европе в 1990-х годах технологию отключения отдельных цилиндров в числе первых внедрил в «серию» Mercedes-Benz. В настоящее время подобная система широко применяется по всему миру [31, 32].

Следующим шагом по повышению экономичности ДВС стало применение аккумуляторной системы впрыска с электронным управлением форсунок. Главной особенностью этих систем является разделение узла, создающего давление – топливный насос высокого давления с аккумулятором, и узла впрыска (форсунки). Первым промышленным образцом аккумуляторной топливной системы с электронным управлением явилась совместная разработка фирм «Robert Bosch GmbH», «Fiat» и «Elasis» 1995 года, а на серийные автомобили стала устанавливаться в 1997 году. Это позволяет снизить расход топлива на частичных режимах и уменьшить токсичность отработавших газов [33, 31].

Тогда же, в 1995 году появляется регулируемый турбокомпрессор, применение которого позволяет как уменьшить токсичность отработавших газов, так и повысить КПД двигателя [20].

В 2005 году фирма «Toyota» начинает серийное производство гибридных двигателей [32]. Гибридная энергоустановка предполагает наличие двух типов двигателей: внутреннего сгорания и электрического, а также аккумулятора, как накопителя энергии. Такая установка на автомобиле может быть выполнена по различным схемам соединения механической и электрической составляющих. Данный симбиоз позволяет обеспечить работу поршневого ДВС на самых экономичных режимах при улучшенных экологических показателях.

Предложенная А.И. Половинкиным гипотеза о прогрессивной эволюции техники имеет следующую формулировку [25].

В технических объектах переход от поколения к поколению происходит нижеперечисленными наиболее вероятными путями иерархического исчерпания возможностей конструкции: а) при неизменном принципе действия и технического решения улучшаются параметры технического объекта до приближения к глобальному экстремуму; б) происходит переход к более рациональному техническому решению, после чего развитие опять идет по циклу а); в) после исчерпания возможностей циклов а) и б) происходит переход к более рациональному физическому принципу действия с дальнейшим развитием по циклам а) и б).

При этом в каждом случае перехода от поколения к поколению происходят изменения конструкции при минимальных интеллектуальных и производственных затратах.

Результаты проведенного анализа истории развития поршневых ДВС приведены в таблице. Ее составление связано с последовательным рассмотрением всех переходов от предшествующей конструкции прототипа S_i к улучшенной структуре S_{i+1} [5, 6]. В процессе анализа каждого перехода реализовались следующие вопросы: какой главный недостаток требовалось изменить в структуре, какие показатели эффективности были улучшены в новой структуре S_{i+1} , какие изменения в структуре S_i обеспечили устранение главного недостатка и улучшения критерия эффективности в S_{i+1} , в какой момент времени произошел переход $S_i \rightarrow S_{i+1}$, действие какой частной закономерности изменения структуры обеспечило переход $S_i \rightarrow S_{i+1}$.

Как видно из таблицы 1, основная идея закона прогрессивной эволюции заключается в том, что в любом используемом техническом объекте (ТО) может быть указан его главный недостаток (дефект) или противоречие, обычно связанные с потребностью улучшения какого-либо критерия эффективности (мощности, производительности, точности, надежности, экологичности и т. п.), при неухудшении или незначительном ухудшении других критериев [5].

Этот недостаток устраняется за счет улучшения конструкции в следующей модели или поколении ТО. При этом из всех возможных изменений конструкции реализуется такое, которое обеспечивает устранение дефекта или необходимое улучшение актуального критерия эффективности при сохранении других критериев и минимальных интеллектуальных и материальных затратах.

Таблица 1 – Описание и анализ прогрессивной эволюции поршневых ДВС

№ S_{i+1}	Главный дефект в предшествующей конструкции S_i	Улучшаемые критерии эффективности в конструкции S_{i+1}	Конструктивные изменения в S_i , обеспечивающие устранение главного дефекта в S_{i+1} Время перехода $S_i \rightarrow S_{i+1}$	Частная закономерность изменения структуры при переходе $S_i \rightarrow S_{i+1}$
1	2	3	4	5
S_1	Неудобство заправки твердым топливом (порох), низкий КПД, трудность воспламенения топлива	Удобство хранения и подачи топлива	Топливо испаряется в самом цилиндре, воздух всасывается в первой половине хода поршня, смесь воспламеняется постоянно горящим запальником	1. Замена твердого топлива на жидкое
S_2	Дороговизна жидкого топлива, трудность воспламенения	Доступность топлива, удобство воспламенения топлива	Подача светильного газа в цилиндр двигателя, электрическое зажигание на 1/3 от ВМТ	2. Замена жидкого топлива на газообразное 3. Электрическое воспламенение
S_3	Высокая теплонепряженность	Повышение надежности	Охлаждение цилиндров	4. Система охлаждения двигателя
S_4	Низкий КПД, особенно на частичных режимах; низкая удельная мощность	Повышение экономичности и удельной мощности	Зажигание в ВМТ от горелки, двигатель двойного действия, центробежный регулятор подачи газового топлива	5. Двигатель двойного действия 6. Регулятор подачи топлива
S_5	Низкий КПД	Повышение экономичности	Сжатие газовой смеси в цилиндре с зажиганием в ВМТ пламенем или губчатой пластиной	7. Предварительное сжатие смеси в цилиндре
S_6	Низкий КПД, некачественный газообмен, высокие нагрузки на КШМ	Повышение экономичности, улучшение газообмена, снижение нагрузок на КШМ	4-тактный газовый крейцкопфный двигатель с клапанным газораспределением, горизонтальное расположение цилиндров	8. 4-тактный двигатель 9. Клапанное газораспределение 10. Крейцкопфный
S_7	Низкий КПД, низкая удельная мощность	Повышение экономичности удельной мощности	Керосиновый крейцкопфный с горизонтальным расположением цилиндров, жидкостное термосифонное охлаждение, центробежное дозирование топлива, зажигание электрической искрой	11. Использование жидкого топлива – керосина с вращающимся вращателем
S_8	Большие габариты и занимаемая площадь	Снижение массогабаритных показателей	Керосиновый вертикальный тронковый карбюраторный, зажигание электрической искрой	12. Карбюраторное смесеобразование
S_9	Высокая стоимость топлива – керосина	Повышение экономичности	Калоризаторный золотниковый тяжелого топлива, запуск сжатым воздухом	13. Калоризатор 14. Запуск сжатым воздухом
S_{10}	Низкая экономичность	Повышение экономичности	Воспламенение от сжатия керосина, распыливаемого компрессором	15. Воспламенение от сжатия 16. Распыл топлива компрессором
S_{11}	Громоздкость системы распыла топлива	Снижение массогабаритных показателей	Бескомпрессорное распыливание топлива топливным насосом и форсункой	17. Бескомпрессорное распыливание топлива
S_{12}	Высокая стоимость топлива	Повышение экономичности	Работа на сырой нефти	18. Система подогрева тяжелого топлива
S_{13}	Невозможность реверсирования двигателя	Возможность реверсирования судового ДВС	Реверсирование 2- и 4-тактных ДВС	19. Система реверса
S_{14}	Низкая удельная мощность и экономичность	Повышение удельной мощности и экономичности	Повышение заполнения цилиндров наддувом 2-тактных и 4-тактных ДВС	20. Система наддува

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
S_{15}	Некачественное смесеобразование бензиновых ДВС	Улучшение смесеобразования	Высокое качество смесеобразования	21. Система впрыска бензина
S_{16}	Низкая удельная мощность дизельных ДВС	Повышение удельной мощности	Двухступенчатый наддув дизельных ДВС	22. Двухступенчатая система наддува
S_{17}	Низкий КПД ДВС на частичных режимах работы	Повышение экономичности двигателя на частичных режимах	Отключение цилиндров на частичных режимах, аккумуляторная система впрыска с электронным управлением форсунок	23. Система отключения цилиндров 24. Аккумуляторная система впрыска
S_{18}	Низкий КПД ДВС на частичных режимах работы	Работа ДВС в экономичном режиме номинальной мощности	Гибридный двигатель на транспортном средстве	25. Поршневой ДВС работает совместно с электродвигателем и аккумулятором

Анализ таблицы показывает, что самыми простыми являются изменения структуры ДВС на уровне параметров: замена твердого топлива на жидкое; замена жидкого топлива на газообразное; появление двигателя двойного действия; применение регулятора подачи топлива; использование клапанного газораспределения; появление крейцкопфного двигателя; запуск сжатым воздухом; система подогрева тяжелого топлива.

Более сложными являются изменения, связанные с изобретением и освоением нового технического решения: применение электрического воспламенения; появление 4-тактного двигателя; применение калоризатора; применение распыла топлива компрессором; появление системы реверса; появление двухступенчатой системы наддува; появление системы отключения цилиндров; применение аккумуляторной системы впрыска.

И, наконец, коренными преобразованиями в ДВС, которые и приводят к изменению его принципа действия, являются: появление системы охлаждения двигателя; обеспечение предварительного сжатия смеси в цилиндре перед воспламенением; появление карбюраторного смесеобразования; воспламенение дизельного топлива от сжатия смеси; бескомпрессорное распыливание топлива (распыливание топлива с помощью специальной топливной аппаратуры, включающей топливный насос высокого давления и форсунку, до этого времени распыл топлива в цилиндрах осуществлялся за счет сжатого воздуха); применение системы наддува, включающего, кроме поршневого ДВС еще и, например, турбокомпрессор (в настоящее время такие двигатели называются комбинированными, т.к. включают кроме ДВС еще и газовую турбину); появление системы впрыска бензина, обеспечивающей более качественное смесеобразование на различных режимах работы двигателя; появление гибридного двигателя, в котором на транспортном средстве работает ДВС с электродвигателем, генератором и аккумуляторной батареей, что обеспечивает снижение мощности двигателя на транспортном средстве с одновременным повышением его экономичности на различных режимах работы.

ВЫВОДЫ

Ускоряющийся рост сложности и разнообразия техники требует, чтобы конструкторы машин имели цельное представление о технике и могли прогнозировать негативные последствия ее развития для человека и общества.

Без знания законов техники невозможно иметь цельное представление о техносфере и решать ряд других современных актуальных задач.

Использование закона прогрессивной эволюции позволяет установить, насколько недоиспользованы возможности применяемого принципа действия. Если эти возможности имеют значительный резерв, то на основе прогнозирования можно добиться улучшения интересующих главных показателей. Если же прогноз показывает, что возможности принципа действия практически исчерпаны, то следует сделать обоснованный вывод о необходимости перехода на новый физический принцип действия.

Гипотеза о законе прогрессивной конструктивной эволюции технических объектов на примере совершенствования поршневых двигателей внутреннего сгорания полностью подтверждается. Необходимо продолжить исследования в этом направлении, что позволит конкретизировать и достаточно полно выделить критерии развития, главные дефекты и частные закономерности изменения конструкции поршневых ДВС различной конструкции и назначения – судовых, тепловозных, автомобильных, тракторных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Le Roy, E. L'Exigence idéaliste et le fait de l'évolution [Le texte] / E. Le Roy. – P.: 1927. – 196 p.
2. Вернадский, В.И. Биосфера и ноосфера [Текст] / В.И. Вернадский. – М.: Наука, 1989. – 261 с.
3. Добров, Г.М. Наука о науке. Введение в общее науковедение [Текст] / Г.М. Добров. – Киев: Наукова Думка, 1966. – 328 с.
4. Мелешенко, Ю.С. Техника и закономерности ее развития [Текст] / Ю.С. Мелешенко. – Л.: Лениздат, 1970. – 246 с.
5. Половинкин, А.И. Теория проектирования новой техники: закономерности техники и их применение [Текст] / А.И. Половинкин. – М.: Информэлектро, 1991. – 104 с.
6. Каменев, А.Ф. Технические системы: закономерности развития [Текст] / А.Ф. Каменев. – Л.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
7. Половинкин, А.И. Законы строения и развития техники: [Текст] учеб. пособие / А.И. Половинкин. – Волгоград: ВолгПИ, 1985. – 202 с.
8. Гальднер, Г. Газовые, нефтяные и прочие двигатели внутреннего сгорания. Их конструкция и работа, их проектирование [Текст] / Пер. с нем. под ред. В.И. Гриневецкого. – М.: 1907. – 594 с.
9. Брилинг, Н.Р. Двигатели внутреннего сгорания [Текст] / Н.Р. Брилинг. – М.-Л.: 1935. – 312 с.
10. Вебер, К.К. Двигатели и приводы. Практическое руководство по выбору, установке и уходу за конными, ветряными, водяными, паровыми и керосиновыми двигателями [Текст] / К.К. Вебер. – СПб: Изд-во А.Ф. Девриена, 1894. – 416 с.
11. Акимов, П.П. Сведения по предыстории ДВС [Текст] / П.П. Акимов // Двигателестроение. – 1985. – № 11. – С. 32-34.
12. Брилинг, Н.Р. Быстроходные дизели [Текст] / Н.Р. Брилинг, М.И. Вихерт, И.И. Гутерман. – М.: Машгиз, 1951. – 520 с.
13. Деревянченко, А.А. У истоков дизелестроения [Текст] / А.А. Деревянченко // Двигателестроение. – 1988. – № 3. – С. 53-54.
14. Гумилевский, Л.И. История локомотива [Текст] / Л.И. Гумилевский. – М.-Л.: 1937. – 216 с.
15. Гумилевский, Л.И. Рудольф Дизель, его жизнь и деятельность. [Текст] / Л.И. Гумилевский. – М.-Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1934. – 182 с.
16. Гумилевский, Л.И. Рудольф Дизель [Текст] / Л.И. Гумилевский. – М.: 1933. – 128 с.
17. ДВС в СССР (Производство двигателей и их потребление) [Текст] / Под общ. ред. В.И. Межлаука. – М., Л: Промиздат, 1927. – 216 с.
18. Дробинский, В.А. Как устроен и работает тепловоз [Текст] / В.А. Дробинский, П.М. Егунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 367 с.
19. Раков, В.А. Локомотивы отечественных железных дорог (1842-1955) [Текст] / В.А. Раков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1995. – 564 с.
20. Батулин, О.В. История изобретения агрегатов наддува двигателей внутреннего сгорания [Текст] / О.В. Батулин, Н.В. Батулин, В.Н. Матвеев // Вестник СГАУ. – 2009. – № 7. – С. 369-376.
21. Берне, Л. Александр Микулин, человек-легенда [Текст] / Л. Берне, В. Перов // Двигатель. – 2000. – № 5-6 (11-12). – С. 42.
22. Конструирование ДВС [Текст]: учебник для студентов вузов / Н.Д. Чайнов [и др.]; под ред. Н.Д. Чайнова. – М.: Машиностроение, 2008. – 496 с.
23. Ховах, М.С. Автомобильные двигатели [Текст] / М.С. Ховах. – М.: Машиностроение, 1977. – 591 с.
24. Воскресенский, А. Electrojector и его потомки [Текст] / А. Воскресенский // Авторевю. – 2008. – № 1. – С. 26-28.
25. Саммерс, М. Турбоагнетатели компании АББ: этапы большого пути [Текст] / М. Саммерс // Авторевю. – 2007. – № 2. – С. 85-91.
26. Лангкабель, Г.Х. Турбодвигатели и компрессоры [Текст]: справочное пособие / Г.Х. Лангкабель. – М.: АСТ: Астрель, 2008. – 350 с.
27. Патархальцев, Н.Н. Наддув двигателей внутреннего сгорания [Текст]: учеб. пособие / Н.Н. Патархальцев. – М.: Изд-во РУДН, 2003. – 319 с.
28. Багиров, Х.В. Некоторые результаты экспериментального исследования рабочего процесса и токсичности двигателя с послойным зарядом [Текст] / Х.В. Багиров // «Пути повышения топливной экономичности

и снижения токсичности автотракторных двигателей»: тезисы докладов Всесоюзной научной конференции. – Баку, 1979. – С. 234-235.

29. Гутаревич, Ю.Ф. Повышение экономичности и снижение токсичности многоцилиндровых двигателей на холостом ходу [Текст] / Ю.Ф. Гутаревич, А.М. Редзюк // «Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания и двигателей новых схем и топлив»: тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. – М.: 1980. – С. 81.

30. Зленко, М.А. Исследование работы карбюраторного двигателя с отключением цилиндров [Текст] / М.А. Зленко, В.А. Лукшо // «Рабочие процессы в двигателях внутреннего сгорания»: тезисы докладов Всесоюзной научной конференции. – М.: 1982. – С. 25.

31. Автомобильный справочник [Текст] / Пер. с англ. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2002. – 896 с.

32. Филиппов, А.З. Лошадки по требованию [Текст] / А.З. Филиппов, А.А. Бешун, Ю.А. Герасимчук // Техника и сервис. – 2005. – № 8. – С. 7-8.

33. Bosch – Системы управления дизельными двигателями [Текст] / Пер. с нем. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. – 480 с.

Фокин Андрей Юрьевич

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
 Ассистент кафедры «Философия, история и социология»
 241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7
 Тел. 8-910-335-95-83
 E-mail: andrew-80@yandex.ru

A.Yu. FOKIN

HYPOTHESIS APPLICATION ABOUT THE LAW OF PROGRESSIVE CONSTRUCTIVE EVOLUTION OF TECHNICAL OBJECTS FOR STUDYING OF CONSTRUCTIVE EVOLUTION OF PISTON INTERNAL COMBUSTION ENGINES

The history of creation and perfection of piston internal combustion engines is considered. The hypothesis about the law of progressive constructive evolution of technical objects on an example of perfection of piston internal combustion engines is confirmed.

Keywords: piston internal combustion engines, progressive evolution, criteria of efficiency, constructive changes.

BIBLIOGRAPHY

1. Le Roy, E. L'Exigence idéaliste et le fait de l'évolution [Le texte] / E. Le Roy. – P.: 1927. – 196 p.
2. Vernadskij, V.I. Biosfera i noosfera [Tekst] / V.I. Vernadskij. – M.: Nauka, 1989. – 261 s.
3. Dobrov, G.M. Nauka o nauke. Vvedenie v obshhee naukovedenie [Tekst] / G.M. Dobrov. – Kiev: Naukova Dumka, 1966. – 328 s.
4. Meleshhenko, Yu.S. Tekhnika i zakonomernosti eyo razvitiya [Tekst] / Yu.S. Meleshhenko. – L.: Lenizdat, 1970. – 246 s.
5. Polovinkin, A.I. Teoriya proektirovaniya novoj texniki: zakonomernosti texniki i ix primenenie [Tekst] / A.I. Polovinkin. – M.: Informe`lektro, 1991. – 104 s.
6. Kamenev, A.F. Texnicheskie sistemy': zakonomernosti razvitiya [Tekst] / A.F. Kamenev. – L.: Mashinostroenie, 1985. – 216 s.
7. Polovinkin, A.I. Zakony' stroeniya i razvitiya texniki: [Tekst] ucheb. posobie / A.I. Polovinkin. – Volgograd: VolgPI, 1985. – 202 s.
8. Gal'dner, G. Gazovy'e, neftyany'e i prochie dvigateli vnutrennego sgoraniya. Ix konstrukciya i rabota, ix proektirovanie [Tekst] / Per. s nem. pod red. V.I. Grineveckogo. – M.: 1907. – 594 s.
9. Briling, N.R. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Tekst] / N.R. Briling. – M., L.: 1935. – 312 s.
10. Veber, K.K. Dvigateli i privody'. Prakticheskoe rukovodstvo po vy'boru, ustanovke i uxodu za konny'mi, vetryany'mi, vodyany'mi, parovy'mi i kerosinovy'mi dvigatelyami [Tekst] / K.K. Veber. – SPb: Izd-vo A.F. Devriena, 1894. – 416 s.
11. Akimov, P.P. Svedeniya po predy'storii DVS [Tekst] / P.P. Akimov // Dvigatelsestroenie. – 1985. – № 11. – S. 32-34.
12. Briling, N.R. By'stroxodny'e dizeli [Tekst] / N.R. Briling, M.I. Vixert, I.I. Guterman. – M.: Mashgiz, 1951. – 520 s.

13. Derevyanchenko, A.A. U istokov dizelestroeniya [Tekst] / A.A. Derevyanchenko // Dvigatelestroenie. – 1988. – № 3. – S. 53-54.
14. Gumilevskij, L.I. Istoriya lokomotiva [Tekst] / L.I. Gumilevskij. – M., L.: 1937. – 216 s.
15. Gumilevskij, L.I. Rudol'f Dizel', ego zhizn' i deyatel'nost'. [Tekst] / L.I. Gumilevskij. – M., L.: Gos. e'nergeticheskoe izd-vo, 1934. – 182 s.
16. Gumilevskij, L.I. Rudol'f Dizel' [Tekst] / L.I. Gumilevskij. – M.: 1933. – 128 s.
17. DVS v SSSR (Proizvodstvo dvigatelej i ix potreblenie) [Tekst] / Pod obshh. red. V.I. Mezhlauka. – M., L.: Promizdat, 1927. – 216 s.
18. Drobinskij, V.A. Kak ustroen i rabotaet teplovoz [Tekst] / V.A. Drobinskij, P.M. Egunov. – 3-e izd., pere-rab. i dop. – M.: Transport, 1980. – 367 s.
19. Rakov, V.A. Lokomotivy' otechestvenny'x zhelezny'x dorog (1842-1955) [Tekst] / V.A. Rakov. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Transport, 1995. – 564 s.
20. Baturin, O.V. Istoriya izobreneniya agregatov nadduva dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Tekst] / O.V. Ba-turin, N.V. Baturin, V.N. Matveev // Vestnik SGAU. – 2009. – № 7. – S. 369-376.
21. Berne, L. Aleksandr Mikulin, chelovek-legenda [Tekst] / L. Berne, V. Perov // Dvigatel'. – 2000. – № 5-6 (11-12). – S. 42.
22. Konstruirovaniye DVS [Tekst]: uchebnik dlya studentov vuzov / N.D. Chajnov [i dr.]; pod red. N.D. Chaj-nova. – M.: Mashinostoenie, 2008. – 496 s.
23. Xovax, M.S. Avtomobil'nye dvigateli [Tekst] / M.S. Xovax. – M.: Mashinostoenie, 1977. – 591 s.
24. Voskresenskij, A. Electrojector i ego potomki [Tekst] / A. Voskresenskij // Avtorevyu. – 2008. – № 1. – S. 26-28.
25. Sammers, M. Turbonagnetateli kompanii ABB: e'tapy' bol'shogo puti [Tekst] / M. Sammers // ABB revyu. – 2007. – № 2. – S. 85-91.
26. Langkabel', G.X. Turbodvigateli i kompressory' [Tekst]: spravocnoe posobie / G.X. Langkabel'. – M.: AST: Astrel', 2008. – 350 s.
27. Patarxal'cev, N.N. Nadduv dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Tekst]: ucheb. posobie / N.N. Patar-xal'cev. – M.: Izd-vo RUDN, 2003. – 319 s.
28. Bagirov, X.V. Nekotory'e rezul'taty' e'ksperimental'nogo issledovaniya rabocheho processa i toksichnosti dvigatelya s poslojny'm zaryadom [Tekst] / X.V. Bagirov // Puti povysheniya toplivnoj e'konomichnosti i snizheniya toksichnosti avtotraktorny'x dvigatelej: tezisy' dokladov Vsesoyuznoj nauchnoj konferencii. – Baku, 1979. – S. 234-235.
29. Gutarevich, Yu.F. Povyshenie e'konomichnosti i snizhenie toksichnosti mnogocilindrov'x dvigatelej na xolostom xodu [Tekst] / Yu.F. Gutarevich, A.M. Redzyuk // Perspektivy' razvitiya kombinirovanny'x dvigatelej vnu-trennego sgoraniya i dvigatelej novy'x sxem i topliv: tezisy' dokladov Vsesoyuznoj nauchno-texnicheskoj konferencii. – M.: 1980. – S. 81.
30. Zlenko, M.A. Issledovanie raboty' karbyuratornogo dvigatelya s otklyucheniem cilindrov [Tekst] / M.A. Zlenko, V.A. Luksho // Rabochie processy' v dvigatelyax vnutrennego sgoraniya: tezisy' dokladov Vsesoyuznoj nauchnoj konferencii. – M.: 1982. – S. 25.
31. Avtomobil'nyj spravocnik [Tekst] / Per. s angl. – M.: ZAO KZHI «Za rulyom», 2002. – 896 s.
32. Filippov, A.Z. Loshadki po trebovaniyu [Tekst] / A.Z. Filippov, A.A. Beshun, Yu.A. Gerasimchuk // Tex-nika i servis. – 2005. – № 8. – S. 7-8.
33. Bosch – Sistemy' upravleniya dizel'ny'mi dvigatelyami [Tekst] / Per. s nem. – M.: ZAO KZHI «Za ru-lyom», 2004. – 480 s.

Fokin Andrej Yur'evich

Bryansk State Technical University, Bryansk
Assistant of department “Philosophy, History and Sociology”
241035, Bryansk, bul'var 50-letiya Oktyabrya, 7
Tel. 8-910-335-95-83
E-mail: andrew-80@yandex.ru

Н.В. ПЕТРОВ, С.Н. ЗЛОБИН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В КРИВОШИПНОМ ПРЕССЕ С ГИДРОДЕМПФЕРОМ ПРИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Обобщены результаты экспериментальных исследований процессов в кривошипном прессе без гидродемпфера и с гидродемпфером при разделительных операциях для разных марок сталей разной толщины вырубаемого материала.

Ключевые слова: кривошипный пресс, гидродемпфер, разделительные операции, растягивающая сила на шатуне.

В работе [1] представлены результаты теоретических исследований процессов в кривошипном прессе с гидродемпфером при выполнении разделительных операций. Для проверки адекватности полученных результатов разработана экспериментальная установка [2], состоящая из демпфирующей системы и экспериментального штампа, и проведены экспериментальные исследования. Были проведены две серии независимых экспериментов.

1. Исследование процессов в кривошипном прессе при разделительных операциях без гидродемпфера.

В данной серии экспериментов проводилось изучение характера влияния силы выруб-ки на растягивающую силу на шатуне, осуществлялось накопление экспериментального материала для последующего сравнения с аналогичным случаем при условии работы кривошипного пресса с гидродемпфером.

Сила выруб-ки менялась за счет использования в качестве выруб-аемого материала материалов с различной силой сопротивления деформации и разной толщины: сталь 10 по ГОСТ 1050-88 толщиной 1,5 мм (сила выруб-ки 30 % от P_H), сталь 10 по ГОСТ 1050-88 толщиной 2 мм (сила выруб-ки 41 % от P_H), сталь Ст. 08 пс по ГОСТ 1050-88 толщиной 3 мм (сила выруб-ки 57 % от P_H), сталь Ст. 08 пс горячекатаная по ГОСТ 1577-70 толщиной 4 мм (сила выруб-ки 75 % от P_H), сталь 65 Г по ГОСТ 1542-71 толщиной 2 мм (сила выруб-ки 87 % от P_H).

2. Исследование процессов в кривошипном прессе при разделительных операциях с гидродемпфером.

В данной серии экспериментов проводилось изучение характера влияния силы выруб-ки на растягивающую силу на шатуне и осуществлялось сравнение полученных экспериментальных данных с аналогичными данными для случая выруб-ки без гидродемпфера и делалось заключение об эффективности разработанной демпфирующей системы по снижению влияния силы выруб-ки на величину растягивающей силы на шатуне.

В ходе проведения экспериментальных исследований регистрировалось изменение во времени силы на шатуне и силы выруб-ки.

Запись измерительной информации производилась известными методами при помощи тензометрических приборов и устройств.

Для измерения силы на шатуне на передней поверхности корпуса шатуна был наклеен тензодатчик типа ПКВ-20-200.

Для измерения силы выруб-ки внутри штампа в зоне непосредственного действия измеряемой силы расположена мессдоза с цилиндрическим упругим элементом, на поверхность которого наклеены тензодатчики типа ПКВ-20-200 (рис. 1).

Для автоматического сбора и обработки опытных данных со всех датчиков разработана информационно-измерительная система (ИИС) [2] на базе программно-аппаратного комплекса фирмы «National Instruments» (NI) (США).

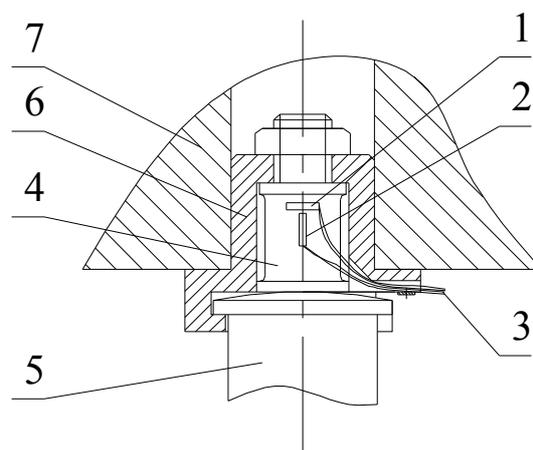


Рисунок 1 – Схема измерения силы вырубки:

1 – компенсационный тензодатчик; 2 – рабочий тензодатчик;
3 – соединительные провода; 4 – месдоза; 5 – пуансон; 6 – хвостовик; 7 – ползун

В начале проведения экспериментальных исследований была произведена запись процессов в кривошипном прессе без гидродемпфера и с гидродемпфером (рис. 2) при базовых значениях параметров.

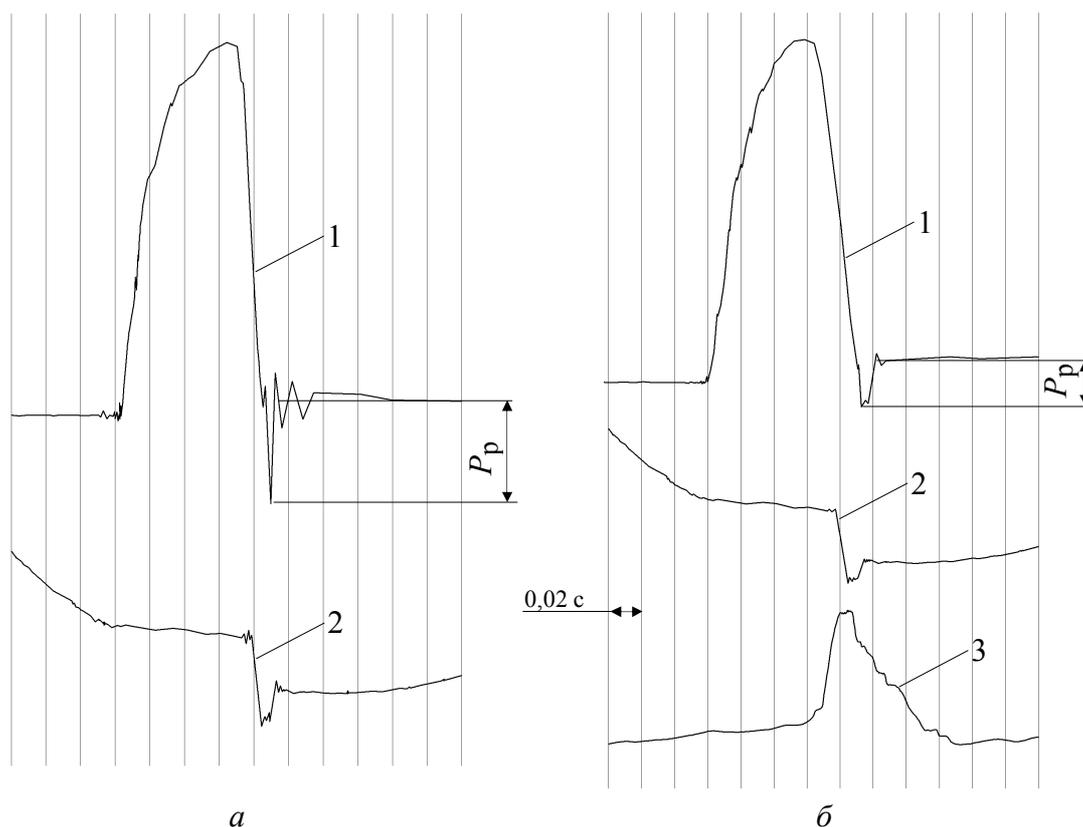


Рисунок 2 – Оциллограммы процессов в кривошипном прессе без гидродемпфера (а) и с гидродемпфером (б):

1 – сила вырубки; 2 – перемещение ползуна;
3 – давление рабочей жидкости в цилиндре гидродемпфера

Из оциллограмм видно, что нагружение пресса до момента перемены знака силы происходит одинаково. После скола заготовки происходит пересопряжение зазоров и нагружение исполнительного механизма растягивающей силой. С этого момента нагружение исполнительного механизма пресса без гидродемпфера и с гидродемпфером существенно раз-

личается. При вырубке на прессе без гидродемпфера растягивающая сила на шатуне достигает 65,2 кН при силе вырубки 216 кН (коэффициент динамичности при разгрузке прессы $k_d = 0,3$). Под действием этой силы возникают опасные напряжения в деталях крепления ползуна к шатуну и крышки шатуна к шатуну.

В прессе с гидродемпфером растягивающая сила на шатуне значительно меньше. Так, при диаметре отверстия дроссельной шайбы равном 6 мм, начальном давлении рабочей жидкости в цилиндре гидродемпфера $1,26 \cdot 10^5$ Па и объеме рабочей жидкости в гидродемпфере $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ растягивающая сила равна 24,8 кН ($k_d = 0,12$), что в 2,63 раза ниже, чем без гидродемпфера. Снижение растягивающей силы на шатуне происходит за счет повышения давления рабочей жидкости в цилиндре гидродемпфера. Сравнивая полученные результаты с результатами теоретических исследований, можно сказать о хорошем их согласовании. Расхождение коэффициентов снижения растягивающей силы на шатуне составляет менее 3 %.

В ходе последующих экспериментов сначала проводилась серия экспериментальных исследований процессов в прессе без гидродемпфера. При этом осуществлялась вырубка деталей из материалов с различной силой сопротивления деформации и разной толщины, а результаты замеров с помощью ИИС регистрировались и записывались в файл. Для повышения точности экспериментальных исследований и снижения влияния случайных отклонений каждый опыт повторялся семь раз. Так как истинное значение измеряемой величины X (сила вырубки, растягивающая сила) неизвестно, то в качестве него принималось среднее арифметическое результатов повторных опытов:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

где i – номер повторного опыта.

Для нахождения среднего квадратического отклонения S в этом случае использовался эмпирический стандарт [3]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n-1}}.$$

Истинное значение X измеряемой величины, полученное в результате серии из $n = 7$ опытов, при заданном уровне значимости α (доверительная вероятность $p = 1 - \alpha$) оценивалось посредством соотношения:

$$X = \bar{X} \pm \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha;k},$$

где $t_{\alpha;k}$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от уровня значимости α и числа степеней свободы $k = n - 1$ и определяемый по таблицам t -распределения (распределения Стьюдента). Для принятого при обработке опытных данных уровня значимости $\alpha = 0,05$ ($p = 0,95$) и $k = 7 - 1 = 6$: $t_{0,05;6} = 2,447$.

Особого внимания заслуживает вопрос об исключении значений, резко выделяющихся по своей величине. Причинами таких грубых ошибок могут являться различные факторы: сбой в работе аппаратуры, невнимательность оператора и т.д. Эти результаты (резко отличающиеся значения) необходимо исключать, пользуясь статистическим критерием, и только тогда, когда они находятся в средней части построенного графика. В настоящей работе исключались значения X , не удовлетворяющие неравенству:

$$\bar{X} - g_{\alpha;n} S < X < \bar{X} + g_{\alpha;n} S,$$

где $g_{\alpha;n}$ – критические значения, например, при $\alpha = 0,05$ и $n = 7$: $g_{0,05;7} = 2,093$.

По результатам проведенных измерений построен график зависимости силы, растягивающей шатун, от силы вырубки (рис. 3).

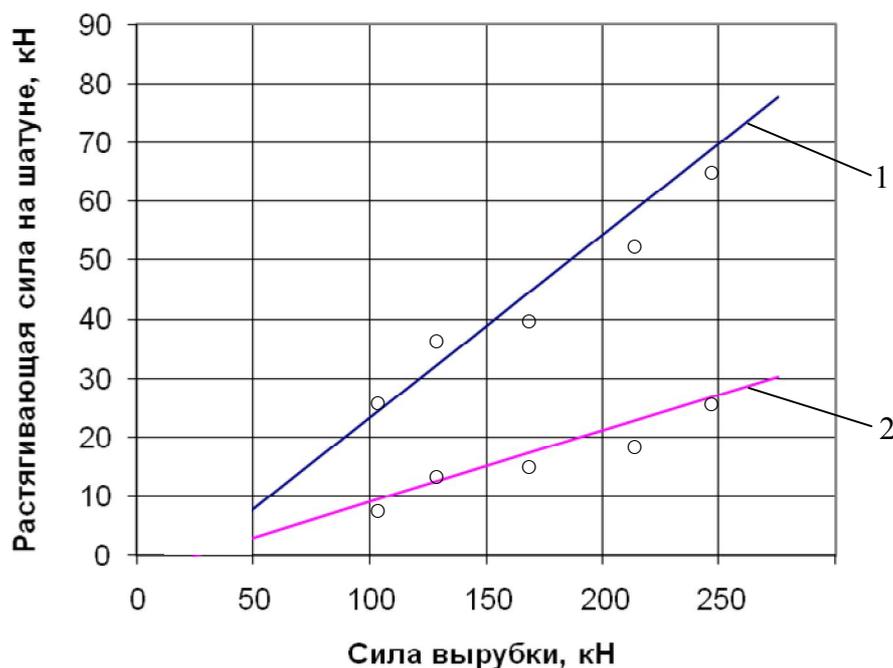


Рисунок 3 – Зависимость растягивающей силы на шатуне от силы вырубki
 1 – без гидродемпфера; 2 – с гидродемпфером
 ———— – расчетные данные; ○○○○○○ – экспериментальные данные

Анализируя данный график, можно отметить, что экспериментальные данные качественно и количественно подтверждают теоретические. Наибольшая погрешность в 17,4 % наблюдается при вырубке более толстой заготовки (толщиной 4 мм). Это можно объяснить тем, что с увеличением толщины заготовки больше энергии упругой деформации частей пресса расходуется на работу трения пуансона о заготовку после вырубki и сила, растягивающая шатун, поэтому уменьшается. Следовательно, можно сделать вывод, что разработанная демпфирующая система дает возможность использовать кривошипные прессы для выполнения разделительных операций с силой, близкой к номинальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Злобин, С.Н. Теоретические исследования процессов в кривошипном прессе с гидродемпфером при разделительных операциях [Текст] / С.Н. Злобин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 2 (280). – С. 40-44.
2. Петров, Н.В. Экспериментальная установка для исследования процессов в кривошипном прессе с гидродемпфером [Текст] / Н.В. Петров, С.Н. Злобин // «Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения»: материалы международной научно-технической конференции. Самара, 1-3 июня 2007 г. – С. 194-196.
3. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.: ил.

Петров Николай Владимирович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Кандидат технических наук, профессор кафедры «Автопласт»
 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
 Тел.: (4862) 41-98-35

Злобин Сергей Николаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. (4862) 43-20-96

E-mail: zsn2@rambler.ru

N.V. PETROV, S.N. ZLOBIN

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF PROCESSES IN THE CRANK PRESS WITH HYDRODAMPER BY THE CUTTING OPERATIONS

The results of the experimental researches in the crank press without hydrodamper and with hydrodamper by the cutting operations for different steel grades of different thickness of material cutting.

Keywords: *the crank press, the hydrodamper, the cutting operations, tensile force on the connecting rod*

BIBLIOGRAPHY

1. Zlobin, S.N. Teoreticheskie issledovaniya processov v krivoshipnom presse s gidrodempferom pri razdelitel'nyx operacijax [Tekst] / S.N. Zlobin // Fundamental'ny'e i prikladny'e problemy' tekhniki i texnologii. – 2010. – № 2 (280). – S. 40-44.

2. Petrov, N.V. E'ksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya processov v krivoshipnom presse s gidrodempferom [Tekst] / N.V. Petrov, S.N. Zlobin // «Aktual'ny'e problemy' dinamiki i prochnosti materialov i konstrukcij: modeli, metody', resheniya»: materialy' mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii. Samara, 1-3 iyunya 2007 g. – S. 194-196.

3. Novickij, P.V. Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij [Tekst] / P.V. Novickij, I.A. Zograf. – 2-e izd., pererab. i dop. – L.: E'nergoatomizdat, 1991. – 304 s.: il.

Petrov Nikolaj Vladimirovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Candidate of technical science, professor of department “Avtoplast”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: (4862) 41-98-35

Zlobin Sergej Nikolaevich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Avtoplast”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. (4862) 43-20-96

E-mail: zsn2@rambler.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.787.6

А.П. БАБИЧЕВ, Н.С. КОВАЛЬ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОЙ КОНСТРУКЦИИ МНОГОМЕСТНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ВИБРОУДАРНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Представлены результаты технологических испытаний опытной конструкции многоместного приспособления для виброударной упрочняющей обработки длинномерных деталей.

Ключевые слова: виброударная упрочняющая обработка, детали сложной формы, лонжерон лопасти рулевого винта вертолета.

Технологические испытания проводились в несколько этапов, с целью определения условий, обеспечивающих наиболее производительную и интенсивную обработку. Опытное приспособление (рис. 1) устанавливалось на торец рабочей камеры вибрационной установки УВГ-40, выдерживая расстояния от ее внутренних поверхностей 20-35 мм в поперечном и 40-50 мм в продольном направлениях. Достигнутое положение фиксировалось затяжкой резьбовых соединений. В качестве рабочей среды использовались стальные полированные шары диаметром 7 и 10 мм. Обработка осуществлялась при следующих режимах: амплитуда $A = 3,5$ мм, частота $f = 30$ Гц.

После начала работы станка наблюдается распределение по объему рабочей камеры загруженных шаров, их взаимодействие с наружными и внутренними поверхностями фрагментов лонжерона. Последние, свободно устанавливаясь в решетчатые отсеки (рис. 2, а), образуют «лопасти», которые, взаимодействуя с рабочей средой (шарами), обеспечивали круговую подачу $S_{кр} = 0,4-0,5$ об/мин (в зависимости от количества подаваемой технологической жидкости и характеристики рабочей среды).

Закрепление деталей 1 осуществлялось путем установки деревянных клиньев 3 на поверхностях корпуса и крышки отсека 2 с последующей затяжкой резьбового соединения 4 (рис.2, б). Отличительной особенностью работы оснастки по рассматриваемой схеме является незначительное повышение скорости ее вращения ($S_{кр} = 0,6$ об/мин).

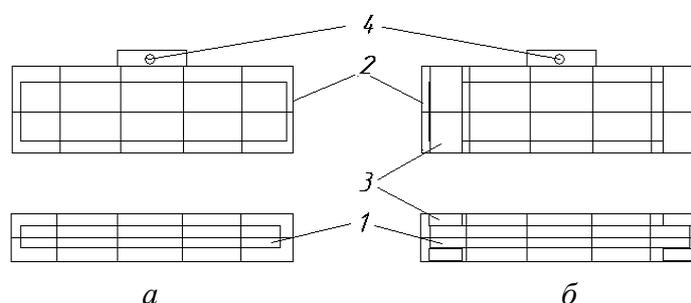
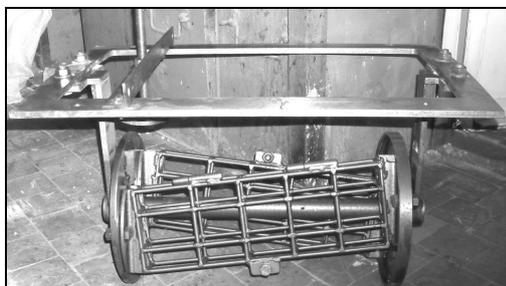


Рисунок 1 – Конструкция опытного многоместного приспособления для виброударной упрочняющей обработки длинномерных деталей

Рисунок 2 – Схемы установки фрагментов лонжерона в решетчатых отсеках приспособления:
а – свободно; б – с закреплением: 1 – фрагмент лонжерона; 2 – отсек решетчатый; 3 – клинья; 4 – резьбовое соединение

Фиксированная (исключающая вращение) работа приспособления, обеспечивалась созданием необходимого натяга между диском и тормозным башмаком (контактирующая поверхность – резиновая прокладка). Наблюдалось возникновение «волны» рабочей среды между стенками камеры и решетчатыми отсеками с одной стороны и образование полости с другой (рис. 3).

По результатам проведенных испытаний установлено, что круговая подача $S_{кр}$ приспособления существенно зависит от ниже рассматриваемых параметров и факторов.

Форма отсеков, в которых размещаются фрагменты лонжерона с образцами-свидетелями, в сечении представляет прямоугольник, следовательно, характер проворачивания будет изменяться во времени ввиду различной площади, взаимодействующей со средой. Масса входящих в приспособление деталей должна быть минимальной с целью уменьшения потерь кинетической энергии шаров. Внесение в конструкцию вала и отсеков различных дополнительных лопастей не приводит к значительному увеличению круговой подачи $S_{кр}$ приспособления. Лопастей, представляющие собой прямоугольный жестяной лист толщиной 2 мм жестко крепились на поверхностях решетчатых отсеков 4, 5 (рис. 4).

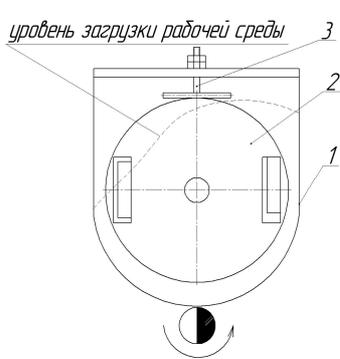


Рисунок 3 – Схема фиксированной работы приспособления:
1 – рабочая камера; 2 – приспособление;
3 – тормозной башмак

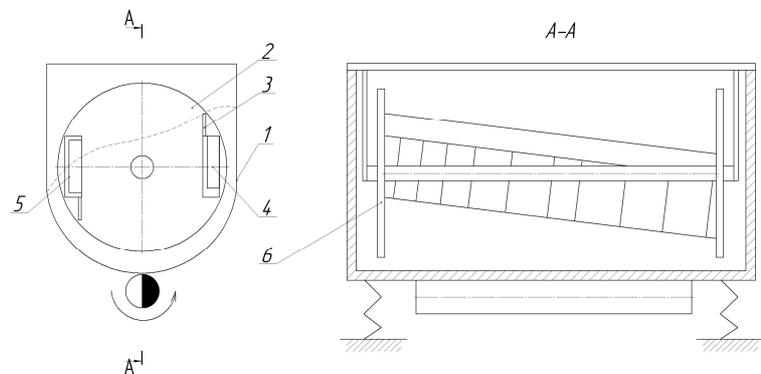


Рисунок 4 – Схема работы приспособления с дополнительными лопастями:
1 – рабочая камера; 2 – приспособление; 3 – лопасть;
4, 5 – решетчатые отсеки; 6 – диски

При работе технологической системы отмечается присутствие большого объема стальных шаров между стенкой рабочей камеры 1 и лопастью отсека 4, в то время как часть отсека 5 остается не погруженной в рабочую среду, что приводит к остановке вращения приспособления. Стальные шары «оггибают» лопасть и движутся между стенками камеры и дисками приспособления 6, в результате чего происходит полное заполнение внутренней полости отсека 5 и поворот приспособления.

Скорость циркуляции рабочей среды, существенно влияющей на вращения приспособления, по мнению [3] во многом зависит от соотношения длины, высоты и ширины рабочей камеры. Отмечается, что при наращивании уровня загрузки стальных шаров равного диаметра в рабочей камере скорость вращения приспособления повышалась вследствие увеличения площади контакта с рабочей средой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии [Текст] / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: ДГТУ, 1999. – 620 с.
2. Бабичев, А.П. Применение вибрационных технологий для повышения качества и эксплуатационных свойств деталей [Текст] / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2005. – 215 с.
3. Емцов, С.Е. Совершенствование процесса вибрационной отделочно-зачистной обработки нежестких деталей, штамповых из листовой нержавеющей стали [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Емцов Сергей Геннадиевич. – Ростов н/Д, 2001. – 186 с.

4. Коваль, Н.С. Разработка и исследование технологической системы «адресной» виброударной обработки деталей сложной формы (на примере использования вибрационных станков с прямоугольной формой рабочей камеры) [Текст]: дис. ... магистра техники и технологии / Коваль Николай Сергеевич. – Ростов н/Д, 2010. – 142 с.

Бабичев Анатолий Прокофьевич

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»
Ростов-на-Дону, ул. Лермонтовская, 90, кв. 117
Тел: 8-863-273-85-13
E-mail: vibrotech@mail.ru

Коваль Николай Сергеевич

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону
Инженер-исследователь НИИ «Вибротехнология»
Ростов-на-Дону, ул. Королева, 16/2 кв. 58
Тел: 8-904-502-78-98
E-mail: koval-nc@mail.ru

A.P. BABICHEV, N.S. KOVAL'

**TECHNOLOGICAL TESTS OF THE SKILLED DESIGN OF THE
MANY-PLACED ADAPTATION FOR VIBROIMPACT HARDENING
TREATMENT OF LENGTHY DETAILS**

Results of technological tests of a skilled design of the many-placed adaptation for vibroimpact hardening treatment of lengthy details are presented.

Keywords: *vibroimpact hardening treatment, accommodation, details complex shape, spar blade tail screw helicopter*

BIBLIOGRAPHY

1. Babichev, A.P. Osnovy' vibracionnoj tehnologii [Tekst] / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Rostov n/D: DGTU, 1999. – 620 s.
2. Babichev, A.P. Primenenie vibracionny'x tehnologij dlya pov'sheniya kachestva i e'kspluatacionny'x svojstv detalej [Tekst] / A.P. Babichev, P.D. Motrenko. – Rostov n/D: DGTU, 2005. – 215 s.
3. Emcov, S.E. Sovershenstvovanie processa vibracionnoj otdelchno-zachistnoj obrabotki nezhyostkix detalej, shtampovy'x iz listovoj nerzhaveyushhej stali [Tekst]: dis. ... kand. texn. nauk: 05.02.08 / Emcov Sergej Genadijevich. – Rostov n/D, 2001. – 186 s.
4. Koval', N.S. Razrabotka i issledovanie tehnologicheskoy sistemy' "adresnoj" vibroudarnoj obrabotki detalej slozhnoj formy' (na primere ispol'zovaniya vibracionny'x stankov s pryamougol'noj formoj rabochej kamery') [Tekst]: dis. ... магистра техники и технологии / Koval' Nikolaj Sergeevich. – Rostov n/D, 2010. – 142 s.

Babichev Anatolij Prokof'evich

Don State Technical University, Rostov-on-Don
Doctor of technical science, professor of department "Machine Building Technology"
Rostov-on-Don, ul. Lermontovskaya, 90, kv. 117
Tel: 8-863-273-85-13
E-mail: vibrotech@mail.ru

Koval' Nikolaj Sergeevich

Don State Technical University, Rostov-on-Don
Engineer-researcher of the scientific-research institute "Vibrotechnology"
Rostov-on-Don, ul. Korolyova, 16/2 kv. 58
Tel: 8-904-502-78-98
E-mail: koval-nc@mail.ru

Д.П. ВОЛКОВ, А.С. ЯМНИКОВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ВИНТОВЫХ ПУАНСОНОВ

Рассмотрен способ изготовления цилиндрических заготовок с пересекающимися насечками на внутренней стороне при помощи пластического деформирования. Описан метод задания параметров впадин на внутренней поверхности заготовок. Проведено сравнение основных методов изготовления пуансонов с винтовыми зубьями. Приведен метод автоматической настройки зубофрезерного станка. Приведен метод контроля винтовой линии зубьев.

Ключевые слова: цилиндрическая заготовка, матрица, пуансон, винтовая линия, зубофрезерование, контроль.

В специальных отраслях машиностроения существует ряд деталей, имеющих форму цилиндра, на внутренних поверхностях которых выполнены углубления в виде наклонных разнонаправленных винтовых канавок. Канавки 2 создают сетку элементов в форме ромбов 3, распределенных на внутренней поверхности цилиндрической оболочки корпуса 1 изделия (рис. 1).

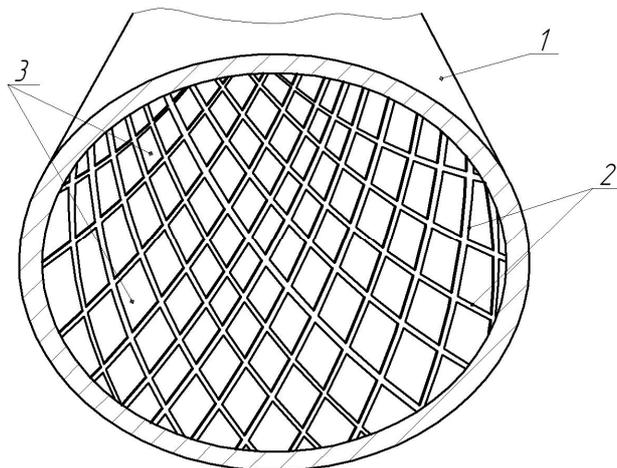


Рисунок 1 – Сетка пересекающихся впадин на внутренней поверхности корпуса

Ранее нами был описан способ получения разнонаправленных винтовых канавок внутри полой цилиндрической детали [1]. Конструкции таких деталей отличается большим разнообразием размеров, числом заходов и глубиной винтовых канавок, поэтому для получения детали необходимо рассчитывать исполнительные размеры винтовых пуансонов и матриц для получения сетки углублений.

Для получения необходимых размеров полая цилиндрическая заготовка проходит обработку пластическим деформированием в три операции. Процесс рассматривается в обратном порядке, т.к. в качестве исходных данных мы имеем конструкторский чертеж детали. По заданным размерам готового изделия и принятым допускам на некоторые размеры происходит последовательный расчет диаметров трех матриц и пуансонов.

Отправной точкой для расчета геометрических параметров многозаходных винтовых пуансонов является чертеж детали. Как правило, на чертеже профиль и размеры канавок, а также расстояние между ними дается на развертке внутренней поверхности, в сечении, перпендикулярном направлению винтовых канавок. Чертежом детали оговаривается и угол наклона винтовых канавок к продольной оси детали. Шаг винтовой линии определяется по формуле:

$$T = \pi(B - 2S)\operatorname{ctg}\beta, \quad (1)$$

где T – шаг винтовой линии, мм;

D – наружный диаметр детали, мм;

S – толщина перемычки между дном канавки и наружным диаметром детали, мм;

β – угол наклона винтовой канавки к оси детали, град.

Количество заходов винтового пуансона определится по зависимости:

$$z = \frac{T \sin \beta}{a} = \frac{\pi(D - 2S)}{a}, \quad (2)$$

где a – шаг винтовой линии в нормальном сечении.

Так как число заходов должно быть целым числом, то полученное значение z округляем до ближайшего целого числа. После этого необходимо произвести корректировку величины a и угла наклона винтовых линий β по следующим зависимостям:

$$a = \frac{\pi(D - 2S)\operatorname{ctg}\beta}{z} = \frac{T \sin \beta}{z}; \quad (3)$$

$$\beta = \arccos \frac{za}{\pi(D - 2S)}. \quad (4)$$

Многозаходные винтовые пуансоны могут быть изготовлены как на токарном, так и на фрезерном оборудовании. Наилучшим с точки зрения точности и качества получения заданных параметров винтовых выступов, является способ фрезерования червячными фрезами. Однако данный метод требует трудоемких расчетов червячного специального инструмента.

Проектируемый инструмент представляет собой цилиндр, имеющий на внешней периферической поверхности винтовые выступы, при обжатии о которые и формируются канавки на внутренней поверхности заготовки. По сути, этот инструмент представляет собой винтовое зубчатое колесо с длиной, значительно превышающей диаметр, и прямобочным профилем зуба. Исходя из этого, изготовление такого инструмента мы будем рассматривать как изготовление специального зубчатого колеса.

Зубчатые колеса являются одними из самых распространенных деталей в машиностроении. Существует множество различных способов их изготовления. Все они разделяются на две группы по принципу получения профиля зуба. К первой относятся виды обработки по методу копирования, ко второй – по методу обката. Наиболее часто встречаются четыре метода обработки зубьев винтовых цилиндрических зубчатых колес, длина которых значительно превышает диаметр.

1. Нарезание косозубых цилиндрических колес профильными резцами производят на токарно-винторезных станках. Колеса нарезают резцами с прямолинейными режущими кромками, установленными в осевом сечении колеса [2]. Процесс характеризуется большими величинами сил резания и, по сути, представляет собой процесс строгания. Нарезание зубьев на наружной стороне цилиндра резцами достаточно широко распространено, главным образом, вследствие простоты изготовления и эксплуатации инструмента и доступности универсальных токарно-винторезных станков.

При нарезании зубьев резцом на универсальном токарно-винторезном станке от рабочего требуется высокая квалификация, так как нужно успевать быстро выводить резец в конце работы и точно подавать его перед последующим проходом на величину врезания.

Нарезание зубьев резцом на универсальных станках применяется в мелкосерийном производстве [3]. При использовании станков с числовым программным управлением отпадает необходимость в согласованном реверсивном перемещении рабочих органов станка. Устройство ЧПУ «запоминает» положение, в котором находилась заготовка и устанавливает ее в это положение, возвращая резец на исходную позицию. Так же осуществляется поворот заготовки на определенный градус при переходе к обработке следующей впадины.

Основное преимущество нарезания зубьев зубчатых колес резцами – возможность нарезания на любом конструкционном материале с достаточно высокой точностью как самого

профиля зуба, так и взаимного положения его относительно других поверхностей детали при минимальном времени подготовки производства.

Недостатки – низкая стойкость инструмента, так как одно и то же лезвие производит и черновую и чистовую обработку, и, как следствие, снижение производительности из-за частого контроля зубьев и частых подналадок [2].

2. Дисковые модульные фрезы применяют для чистового и чернового нарезания цилиндрических зубчатых колес с прямыми и косыми зубьями, шлицевых валов, секторов, реек, чернового нарезания конических колес с прямыми зубьями и чистового нарезания мелко-модульных зубчатых колес. Нарезание осуществляется на специальных и универсально-фрезерных станках методом копирования. Каждый зуб нарезается отдельно с единичным делением.

Метод нарезания дисковыми фрезами применяют в ремонтном деле и при изготовлении небольших партий зубчатых колес, к точности которых не предъявляется больших требований. Практически точность изготовления цилиндрических колес соответствует 10-й степени точности (ГОСТ 1643-81). Лимитирующим фактором обычно является погрешность шага, которая зависит от делительного механизма. К преимуществам этого метода следует отнести низкую стоимость инструмента и возможность изготавливать детали с различной формой зуба.

Дисковые модульные фрезы обычно применяются для чернового нарезания зубьев цилиндрических зубчатых колес. Черновые дисковые фрезы для улучшения условий резания проектируют с передним углом $8 \dots 10^\circ$. Для повышения производительности, особенно при обработке колес с большим числом зубьев, производится одновременная обработка двух и трех зубьев спаренными дисковыми фрезами. Применяются различные схемы обработки: черновое нарезание одновременно двух и трех зубьев, а также одновременное черновое и чистовое нарезание. Спаренные дисковые фрезы требуют точной установки относительно оси обрабатываемого колеса. Когда обработка ведется двумя фрезами, их устанавливают симметрично относительно оси колеса. Если на оправке установлены три фрезы для черновой обработки, средняя фреза должна устанавливаться симметрично оси колеса. Когда на оправке с фрезой для чистовой обработки устанавливается одна или две фрезы для черновой обработки, центрирование относительно оси колеса осуществляется по фрезе для чистовой обработки [3].

3. При обработке зубьев шестерен долбяками на зубодолбежных станках долбяк совершает возвратно-поступательное движение, вращается вокруг своей оси и получает радиальную подачу при врезании. Зубодолбление обычно применяется при ограниченной ширине канавок для выхода инструмента, при изготовлении узкозвенцовых колес и колес с внутренним зацеплением. Очевидно, что зубодолбежные станки можно использовать и для обработки винтовых канавок. Однако следует иметь в виду, что долбяками могут быть обработаны такие профили, для которых отсутствует подрезание. Кроме того, режущая кромка долбяка должна иметь в общем случае сложную форму, что создает определенные трудности в изготовлении инструмента. В связи с этими затруднениями долбяки обычно изготавливают из быстрорежущей стали. В сочетании с высокой стоимостью долбяков это приведет к увеличению расходов на эксплуатацию инструмента.

В связи с указанными соображениями можно предположить, что использование долбления может оказаться целесообразным только в массовом и крупносерийном производстве при нарезании винтовых канавок на заготовках из сталей с высокой обрабатываемостью при ограниченной зоне выхода инструмента. В других случаях долбление канавок, по-видимому, нецелесообразно.

4. Нарезание зубьев червячной фрезой. Этот процесс является наиболее распространенным и самым трудоемким в производстве зубчатых колес. На зубофрезерных станках червячными фрезами нарезают зубчатые колеса внешнего зацепления с прямыми и косыми зубьями, конической и бочкообразной формы, червячные колеса, шлицевые валы с различной формой зубьев, звездочки цепных передач и другие детали. Метод нарезания зубьев чер-

вячной фрезой экономичен. Червячной фрезой одного нормального модуля и одного угла профиля можно нарезать прямозубые и косозубые колеса с различным числом зубьев и углом наклона линии зуба. Размер обрабатываемого колеса лимитируется размерами станка. Этот метод применяется при чистовом и черновом нарезании зубьев под шевингование и шлифование в массовом и единичном производстве. Качество зубчатого колеса при зубофрезеровании червячной фрезой определяется точностью и жесткостью зубофрезерного станка, точностью заготовки, зажимного приспособления, фрезы и правильной их установки на станке. При нормальном ведении процесса можно достигнуть 7-8-й степени точности.

При фрезеровании зубчатого колеса 3 (рис. 2, а) методом обката профиль зубьев образуется червячной фрезой 1 с исходным контуром производящей зубчатой рейки 2. Червячная фреза является червяком, нитки винта разделены продольными стружечными канавками на отдельные зубья с прямолинейным профилем, у которых в результате затылования образуются задние и передние углы, необходимые для обработки резанием. Эвольвентный профиль зубьев колеса образуется прямолинейными режущими кромками фрезы в процессе их взаимного обката.

На рисунке 2, б показано, как следующие один за другим зубья 4 червячной фрезы входят в контакт с зубом 5 обрабатываемого колеса и формируют эвольвентный профиль. Кинематический процесс нарезания зубьев колеса червячной фрезой следует рассматривать как зацепление червяка и червячного колеса.

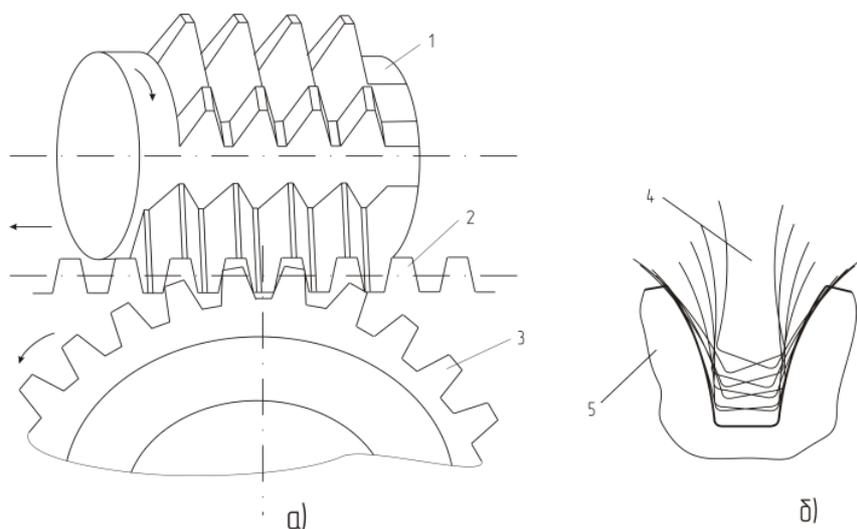


Рисунок 2 – Принцип образования зубьев червячной фрезой

Наибольшее распространение в промышленности получило нарезание зубьев цилиндрических колес червячными фрезами методом обката. Могут быть изготовлены зубчатые зацепления 5-9-й степени точности, при этом наиболее высокие показатели достигают на прецизионных станках с использованием червячных фрез классов А и АА и точной технологической оснастки.

На резьбофрезерном станке с механическими связями при помощи дифференциального привода возможно производить методом обкатки фрезерование спиральных профилей, винтовых зубчатых колес, специальных шлицевых валов и др. [5]

Дифференциальный механизм передает шпинделю, для зажима обрабатываемой детали, еще одно дополнительное вращение, регулируемое по средствам сменных шестерен в зависимости от направления изготавливаемого спирального профиля, то есть ускоренное или замедленное.

Для расчета направления спиральной канавки, определения передаточного отношения сменных шестерен и направления вращения инструмента и обрабатываемой заготовки воспользуемся формулой:

$$\frac{A \cdot C}{B \cdot D} = \frac{4,0425 \sin \alpha}{m_n g}, \quad (5)$$

где A, B, C, D – числа зубьев сменных колес дифференциала;

α – угол подъема винтовой линии;

m_n – нормальный модуль;

g – число заходов фрезы.

Далее традиционная методика расчета требует произвести вычисления правой части формулы (5). Результат округляется таким образом, чтобы получить трехзначное число, затем оно раскладывается на множители, и уже из них из списка колес подбирают требуемую комбинацию. Метод весьма трудоемок и характеризуется невысокой точностью.

Для автоматизации вычислений была создана программа, осуществляющая перебор всех возможных сочетаний зубчатых колес в дифференциале. При этом она может выдавать как все возможные комбинации, так и ограниченные возможностями установки колес. Точность вычисления задается при запуске программы, как правило, она на два порядка выше, чем при обычном способе расчетов.

Схема алгоритма основного цикла программы представлена на рисунке 3.

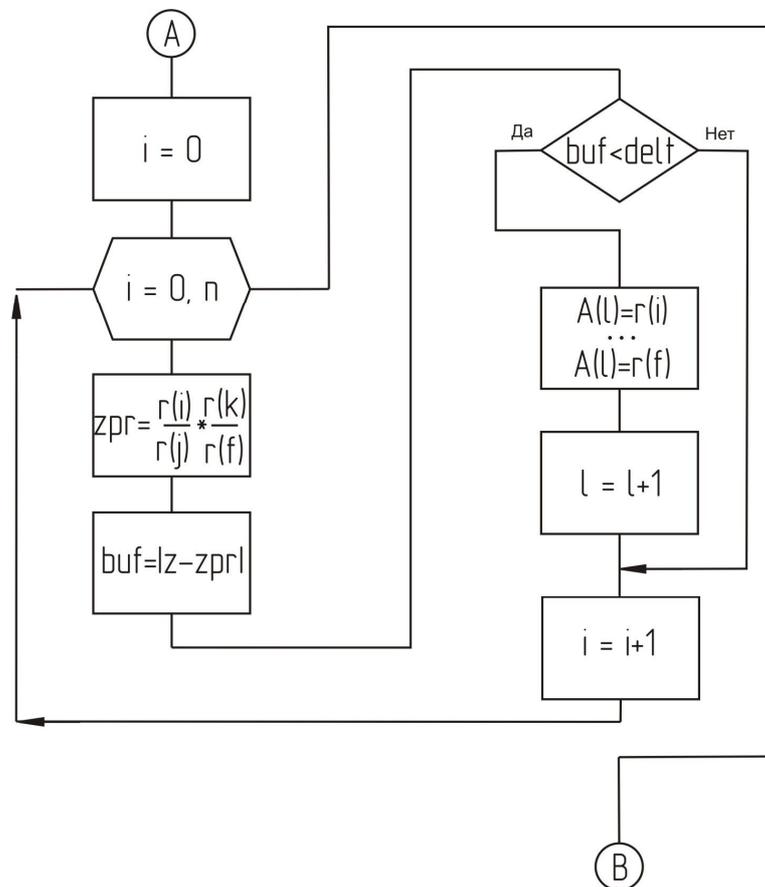


Рисунок 3 – Схема алгоритма основного цикла программы

В программе четыре цикла, так как происходит последовательный подбор числа зубьев для каждого колеса. В первом блоке происходит обнуление счетчика перед входом в цикл. Во втором запускается сам цикл, он будет выполняться от 0 до n – общего числа колес. В третьем – получаем значение левой части формулы (5). В четвертом в буфер помещается модуль разницы между полученным передаточным отношением и требуемым. В пятом происходит сравнение числа в буфере и значения погрешности, если значение меньше, то массиву переменных присваивается значение данной комбинации. Далее происходит переключение счетчиков и возврат в цикл [4].

На рисунке 3 показана упрощенная схема. Из нее исключены проверка повтора зубчатых колес, выход из цикла при ошибке, а также присвоение переменной полученного значения погрешности.

Также в программе присутствуют такие необходимые элементы, как присвоение массиву переменных значений количества зубьев зубчатых колес, проверка на корректность введенных данных, процедуры вывода данных на экран дисплея и вывода данных в файл.

Число зубьев каждого зубчатого колеса, их количество, а также допустимое межосевое расстояние, ограничивающее возможность установки колес, может быть установлено в файле, который использует данная программа. Это делает ее более универсальной. По умолчанию в файле хранятся значения для исследуемого станка. Полученные в ходе расчетов результаты также сохраняются программой в текстовый файл, что позволяет получать к ним доступ без повторного запуска программы.

Программа написана на языке Visual Basic 6.0, что позволяет запустить ее на персональном компьютере без дополнительной установки интегрированной интерактивной среды и делает ее максимально простой в использовании.

Наиболее важными контролируемыми параметрами изготовленного пуансона являются шероховатость поверхности его винтовых зубьев, а также точность полученной винтовой линии. Для контроля винтовой линии существует специальный прибор – ходомер.

Принцип работы ходомера заключается в воспроизведении механизмом прибора расчетной винтовой линии и сравнении ее с реальной, получающейся как след сечения поверхности зуба цилиндрической поверхностью, соосной оси колеса. Ходомер позволяет выявить как общее отклонение хода винтовой линии от расчетной, так и местные погрешности. Существующие ходомеры предназначены для проверки зубчатых колес диаметром до 400 мм. Ходомеры различаются схемами воспроизведения расчетной винтовой линии. В наиболее простых ходомерах винтовая линия воспроизводится с помощью копира, имеющего винтовую линию с такими же параметрами, как и у проверяемого колеса. Такие ходомеры применяются для проверки колес в массовом производстве. В других ходомерах винтовая линия воспроизводится механическим устройством (например, синусным или рычажным), осуществляющим согласованное вращение проверяемого зубчатого колеса и поступательное перемещение измерительного наконечника с первичным преобразователем или одновременное вращение и поступательное перемещение проверяемого колеса относительно неподвижно установленного такого же измерительного наконечника. Получают распространение ходомеры, в которых вместо механического способа сравнения действительной винтовой линии зубчатого колеса с расчетной используется ЭВМ [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямников, А.С. Изготовление винтовых выступов на пуансоне [Текст] / А.С. Ямников, Д.П. Волков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 4/3 (288). – С. 99-104.
2. Калашников, А.С. Технология изготовления зубчатых колес [Текст] / А.С. Калашников. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.
3. Ямников, А.С. Основы технологии машиностроения [Текст]: учебник / Под ред. А.С. Ямникова. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006 – 269 с.
4. Сайлер, Б. Использование Visual Basic 6. Классическое издание [Текст] / Б. Сайлер, Д. Споттс; пер. с англ. – М., СПб., К.: Издательский дом «Вильямс», 2007. – 832 с.
5. Производство зубчатых колес [Текст]: справочник / С.Н. Калашников [и др.]; под общ. ред. Б.А. Тайца. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.

Волков Дмитрий Петрович

Тульский государственный университет, г. Тула
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»
Тел. (4872) 33-23-10
E-mail: dreamslider@mail.ru

Ямников Александр Сергеевич

Тульский государственный университет, г. Тула

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Тел. (4872) 33-23-10

E-mail: yamnikovas@mail.ru

D.P. VOLKOV, A.S. YAMNIKOV

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MANUFACTURING AND QUALITY CHECKING OF HELICAL SURFACE PUNCHES

The making method of cylindrical storages with plastic deformation is considered here. The specify method of cavity parameters on the internal surface of storages is described. The main methods of helical punches making are compared. Gear milling machine automatic setup method is considered. Helical line control method is shown here.

Keywords: cylindrical storage, die, punch, helical line, gear milling, quality checking.

BIBLIOGRAPHY

1. Yamnikov, A.S. Izgotovlenie vintovy'x vy'stupov na puansone [Tekst] / A.S. Yamnikov, D.P. Volkov // Fundamental'nye i prikladny'e problemy' tekhniki i tekhnologii. – 2011. – № 4/3 (288). – S. 99-104.
2. Kalashnikov, A.S. Tekhnologiya izgotovleniya zubchaty'x kolyos [Tekst] / A.S. Kalashnikov. – M.: Mashinostroenie, 2004. – 480 s.
3. Yamnikov, A.S. Osnovy' tekhnologii mashinostroeniya [Tekst]: uchebnik / Pod red. A.S. Yamnikova. – Tula: Izd-vo TulGU, 2006 – 269 s.
4. Sajler, B. Ispol'zovanie Visual Basic 6. Klassicheskoe izdanie [Tekst] / B. Sajler, D. Spotts; per. s angl. – M., SPb., K.: Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2007. – 832 s.
5. Proizvodstvo zubchaty'x kolyos [Tekst]: spravochnik / S.N. Kalashnikov [i dr.]; pod obshh. red. B.A. Tajca. – 3-e izd. pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 464 s.

Volkov Dmitriy Petrovich

Tula State University, Tula

Postgraduate student of department “Machine Building Technology”

Tel.: (84872) 33-23-10

E-mail: dreamslider@mail.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

УГОЛ СДВИГА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Проведен критический анализ критериев стружкообразования при шлифовании и зависимостей для угла сдвига. Представлена новая зависимость для начального угла сдвига, основанная на предположении о равенстве максимальных нормальных и касательных напряжений в плоскости сдвига. Предложен новый критерий стружкообразования при микрорезании единичной абразивной режущей кромкой.

Ключевые слова: угол сдвига, микрорезание единичной режущей кромкой, критерий стружкообразования.

Принципиальным вопросом в теории шлифования при исследовании производительности технологической операции и качества обработанной поверхности является вопрос о возможности отделения стружки абразивной режущей кромкой.

В теории шлифования сформировалось устойчивое представление о том, что режущая кромка абразивного зерна представляет собой тело произвольной формы, которое, внедряясь в обрабатываемый материал, распределяет часть материала в навалы по краям шлифовочной риски, часть материала подминает задней поверхностью, а часть материала с некоторой глубины внедрения формирует в стружку. Однако, при моделировании процесса микрорезания единичной абразивной кромкой большинство исследователей придерживается схемы резания клином с округленной вершиной, предполагая единственный передний угол с большим отрицательным значением. Исходя из этого, и отечественные, и зарубежные исследователи предлагают разделять все множество абразивных зерен (равно как и абразивных кромок) на режущие, давящие, и скользящие по критерию a_z/ρ . При $a_z/\rho = 0$ абразивная кромка скользит по обрабатываемой поверхности без деформации последней. При возрастании a_z/ρ абразивная кромка начинает деформировать материал, и после достижения условия $a_z/\rho > [a_z/\rho]$ появляется стружка.

На наш взгляд, не вся передняя поверхность абразивной режущей кромки формирует стружку даже при внедрении на глубину более критической. Указанный выше критерий a_z/ρ , описывая режущую кромку в целом, не может служить критерием выделения на ее передней поверхности зоны, в которой стружка образуется. Более того, данный критерий не учитывает свойств обрабатываемого материала.

В соответствии с вышесказанным, целью настоящей работы было предложить критерий стружкообразования при шлифовании с учетом физико-механических свойств материала и криволинейности передней поверхности режущей кромки.

В теории резания условие стружкообразования определяется углом сдвига β_1 , поскольку данный угол определяет напряженно-деформированное состояние процесса стружкообразования и формирования обрабатываемой поверхности. Это определяет тот факт, что несмотря на существование двух схем стружкообразования – с единственной плоскостью сдвига и с развитой зоной сдвиговых деформаций – угол сдвига (единственный или начальный и средний) определяют все исследователи. Автор попытался собрать существующие формулы по определению угла сдвига: они представлены в таблице 1

Анализ данных таблицы показывает, что для определения угла сдвига необходимо знать коэффициенты внутреннего и внешнего трения, передний угол на режущей кромке. Однако сведений по коэффициентам внутреннего трения практически нет, а имеющиеся сведения противоречивы. Как отмечает Б.А. Кравченко [6], даже найденные значения угла внутреннего трения могут быть использованы для расчетов при резании металлов с большим приближением.

Таблица 1 – Аналитические формулы для определения угла сдвига [1-7]

№ п/п	Автор	Расчетная формула
1	2	3
1	Зворыкин К.А., 1890	$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$
2	Брикс А.А., 1896	$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} + \frac{\rho_1 - \psi}{2}$
3	Lindner, 1907	$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} + \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$
4	Ernst и Merchant, 1941	$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\rho_1}{2}$
5	Merchant, 1945	$\beta_1 = \frac{\arctg(K)}{2} + \frac{\gamma}{2} - \frac{\rho_1}{2}$
6	Merchant	$\beta_1 = 38,5^\circ + \gamma - \rho_1$
7	Stabler, 1951 Зорев Н.Н., 1952	$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \rho_1$
8	Зорев Н.Н., 1956	$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \arctg \frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma}$
9	Lee и Shaffer, 1951	$\beta_1 = 45^\circ + \gamma - \rho_1$
10	Hucks, 1951	$\beta_1 = 45^\circ + \gamma - \frac{1}{2} \arctg 2\rho_1$
11	Black и Hung, 1951	$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \psi$
12	Shaw, Cook и Finnie, 1953	$\beta_1 = 45^\circ + \gamma - \rho_1 + \eta'$
13	Окушима и Хитоми, 1958	$\beta_1 = \frac{K_{1,2}}{2} + \frac{\gamma}{2} - \frac{\rho_1}{2},$ <p>где $K_1 = \arcsin\left(\frac{2}{k_1} \sin \rho_1 + \sin(\rho_1 - \gamma)\right);$</p> $K_2 = \arccos\left(\frac{2}{k_2} \sin \rho_1 - \cos \rho_1\right)$
14	Палмер и Оксли, 1959	$\beta_1 = 50^\circ - 0,8(\rho_1 - \gamma)$
15	Трент, 1980	$\beta_1 = \arctg \frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma}$
16	Кобаяши А., 1974	$\beta_1 = \arctg \frac{K \cos \gamma}{1 - K \sin \gamma}$

Продолжение таблицы 1

1	2	3
17	Кравченко Б.А., 1981	$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\rho_1 + \psi}{2}$
18	Усов В.П., 1994	$\beta_1 = 90^\circ + \gamma - \left[\rho_1^* + (\psi + \rho_2^{(0)}) \right]$
19	Носов Н.В., 1997	$\beta_1 = \arctg \frac{a_Z \cdot \cos \gamma}{a_Z \cdot K_a + \rho \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\gamma}{2} \right)}$
20	Железнов Г.С., 2000	$\beta_{10} = \arctg \left[\frac{-c - \sqrt{c^2 - 4v(D-v)}}{2(D-v)} \right]$
21	Payton, 2002	$\chi + \rho_1 = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2} = \psi + \beta_1$

Многие соотношения, как отмечают И.Дж.А. Армагеро и Р.Х. Браун [2] могут быть сведены к следующему простому уравнению: $\beta_1 = C_1 - C_2(\rho_1 - \gamma)$. Кроме того, формулы для определения угла сдвига не учитывают физико-механических свойств материала. Правда, «некоторые из них, в частности соотношения Колдинга, Сата, Юшикавы, были получены с учетом свойств материала, однако большинство из них выведены в предположении, что материал не влияет на угол сдвига». Необходимо отметить и то, что большинство формул при большом отрицательном переднем угле дают отрицательный результат для угла сдвига.

Для расчета угла сдвига сделаем следующие допущения:

- определяется начальный угол сдвига для момента начала стружкообразования;
- в зоне резания деформации таковы, что максимальные касательные напряжения сдвига сравнимы с максимальными нормальными напряжениями растяжения

$$\tau_{CP_{\max}} = \sigma_{P_{\max}} ; \tag{1}$$

- между модулями сдвига и упругости сохраняется связь через модуль Пуассона при любых условиях контактного взаимодействия.

На основании закона Гука для различных видов деформации уравнение (1) перепишем в виде

$$G' \cdot \operatorname{tg} \gamma_\tau = E' \cdot [\delta] , \tag{2}$$

где G' и E' – соответственно модули для заданных уровней деформации;

γ_τ – угол сдвига при деформации сдвига;

$[\delta]$ – относительное удлинение при разрыве.

Согласно третьему допущению, зависимость (2) можно переписать как

$$\operatorname{tg} \gamma_\tau = 2 \cdot ([\delta] + [\psi])$$

или для угла сдвига

$$\beta_1 = \arctg \frac{1}{2 \cdot ([\delta] + [\psi])} . \tag{3}$$

Анализ довольно простой формулы (3) показывает, что материалы с низким значением удлинения и сужения имеют большой начальный угол сдвига.

В таблице 2 даны физико-механические свойства некоторых групп сталей [8] в зависимости от видов обработки, температуры, а также рассчитанные для них углы сдвига по формуле (3).

Таблица 2 – Физико-механические характеристики сталей [8]

Т, °С	Сталь 20			Сталь 12Х2МФБ (ЭИ531)			Сталь 20Х13			Сталь 13Х12Н2В2МФ (ЭИ961)		
	[δ]	[ψ]	β ₁ , расч.	[δ]	[ψ]	β ₁ , расч.	[δ]	[ψ]	β ₁ , расч.	[δ]	[ψ]	β ₁ , расч.
20	30,0	62,0	28,5	36,0	78,0	23,7	21,0	65,0	30,2	15,0	55,0	35,5
300	27,0	66,0	28,3				18,0	66,0	30,8	14,0	55,0	35,9
400	26,0	78,0	25,7				16,5	58,0	33,9	14,0	56,0	35,5
500	26,0	76,0	26,1	35,3	78,0	23,8	22,0	71,0	28,3	14,0	60,0	34,0
600	30,0	80,0	24,4	34,0	80,0	23,7	36,0	83,0	22,8	15,0	70,0	30,5
650				38,0	85,0	22,1				20,0	78,0	27,0
Т, °С	Сталь 31Х19Н9МВБТ (ЭИ572)			Сталь 4Х15Н7Г7Ф2МС (ЭИ388)			Сталь 10Х11Н20ТЗР (ЭИ696)			Сплав ХН35ВТ (ЭИ612)		
	[δ]	[ψ]	β ₁ , расч.	[δ]	[ψ]	β ₁ , расч.	[δ]	[ψ]	β ₁ , расч.	[δ]	[ψ]	β ₁ , расч.
20	32,0	25,0	41,3	15,0	15,0	59,0	25,0	30,0	42,3	18,0	30,0	46,2
400	28,0	43,0	35,2	12,0	23,0	55,0	23,0	30,0	43,3	19,0	35,0	42,8
500	26,0	45,0	35,2	12,0	23,0	55,0	23,0	30,0	43,3	15,0	23,0	52,8
600	26,0	46,0	34,8	9,0	23,0	57,4	22,0	30,0	43,9	15,0	30,0	48,0
700	21,0	40,0	39,3	8,0	32,0	51,3	15,0	18,0	56,6	9,0	11,0	68,2
750	25,0	52,0	33,0				15,0	20,0	55,0			
800	29,0	64,0	28,3	8,0	17,0	63,4	25,0	45,0	35,5			

Анализ таблицы 2 показывает, что для конструкционных сталей угол сдвига лежит в области значений 24-35°, что соответствует экспериментальным значениям [6]. С повышением жаропрочности стали угол сдвига растет. Увеличение угла сдвига с увеличением температуры проходит точку максимума, конкретную для каждой стали, причем для сплава ЭИ612 этот максимум совпадает с максимумом рабочей температуры. Обращает на себя внимание тот факт, что угол сдвига для некоторых сталей достаточно большой (больше 45°) и экспериментального подтверждения не получает. Это можно объяснить тем, что данная теория нуждается в доработке в случае резания твердых и хрупких материалов.

Предлагается ввести допущение, что при углах сдвига менее 45° материал разрушается пластически, стружка образуется сливная. Чем больше угол сдвига, тем более выражены элементы стружки – образуется стружка скалывания. При углах сдвига более 45° материал разрушается хрупко, образуется стружка сдвига, а действительный угол плоскости сдвига элементов стружки будет определяться по формуле

$$\beta_1 = \beta_1 - 45^\circ.$$

В этой интерпретации при шлифовании, например, стали ЭИ696 или ЭИ612 в зависимости от режимов резания следует ожидать как сливных стружек, так и стружек скалывания и сдвига, а у стали 20 стружек сдвига быть не должно.

Необходимо отметить, что рассчитанные значения угла сдвига определены на основе данных для малых скоростей деформации и свободном растяжении-сжатии. Конечно, в случае несвободного резания и больших скоростях деформации, которые имеют место при шлифовании, значения угла будут иными.

Рассчитанный угол сдвига может быть использован при выделении на поверхности абразивной режущей кромки зоны стружкообразования. Например, А.С. Козлов [9], опираясь на исследования С.Н. Корчака [10] о возможности срезания стружки при определенном соотношении глубины резания и угла сдвига, а также на теоретические исследования по определению угла сдвига, предложил разделять переднюю поверхность режущей кромки на бесконечно малые площади, из которых стружка будет образовываться на тех, что удовлетво-

ряют критерию

$$1 < \frac{(0,1...0,2)}{\sin \left(\arctg \left(\frac{\cos \gamma + 0,05\eta}{0,9\eta - \sin \gamma} \right) \right)},$$

где η – коэффициент усадки стружки.

В данной формуле знаменатель является решением для угла сдвига. На основе разработанного критерия он определил количество режущих кромок на рабочей поверхности абразивного инструмента. Но в работе не было предложено решения для минимальной глубины внедрения, не указано, как выбирались образцы абразивных зерен, пределы критерия довольно размыты, а коэффициент усадки стружки можно указать только приблизительно.

Учитывая все вышесказанное и соглашаясь с решением задачи, данным А.С. Козловым, предлагаем свое решение для комбинированного критерия стружкообразования при шлифовании единичной режущей кромкой.

Пусть обрабатываемый материал 2 испытывает усилие деформации от абразивной режущей кромки 1, движущейся в направлении оси z (рис. 1).

Сделаем предположение, что слои обрабатываемого материала у передней поверхности абразивной режущей кромки, где угол сдвига β_1 слоев материала меньше угла наклона касательной к образующей режущей кромки β_i , будут срезаться.

Такое предположение следует считать обоснованным, поскольку, например, С.В. Скороходов [11] для тонкого точения сталей 20, 45, 38ХНЗМФА, 0Х18Н10Т и У10 с толщиной среза 2,5-2000 мкм со скоростью резания 1,6-10 м/с теоретически установил, что при отношениях $a_z/\rho = 0,05-0,0625$ или передних углах близких к $-60...-64^\circ$ в стружку переходит менее 5% от устанавливаемого настройкой инструмента, при $\gamma = -65^\circ$ наблюдается процесс поверхностного пластического деформирования, а предельный передний угол составляет -72° . Аналогичный результат получили Y. Ohbuchi и T. Obikawa [12]: по результатам моделирования процесса микрорезания единичной абразивной кромкой в виде трехгранной пирамиды доля стружек для всех кромок с углами $-60...-90^\circ$ составляет 5% от количества стружек по всем режущим кромкам.

Слоям материала, лежащим выше точки A , ничто не мешает двигаться под углом $\beta_2 > \beta_1$ вдоль плоскости сдвига наружу и удаляться в стружку. Слои материала, лежащие ниже точки A , для которых $\beta_1 > \beta_3 > \beta_4$, будут подминаться абразивной режущей кромкой 1. В зависимости от того, в каком сечении будут находиться рассматриваемые слои материала (ближе к центральному или ближе к боковой поверхности), они либо будут удаляться в навалы, либо подминаться режущей кромкой. Можно предположить с большой долей вероятности, что слои материала, лежащие ниже определенного уровня, не смогут удалиться в навалы совсем. Если через режущую кромку провести ряд параллельных плоскостей в направлении вектора скорости резания и для каждого сечения определить положение точки A , можно получить линию, разделяющую переднюю поверхность режущей кромки на зоны стружкообразования и деформирования без стружкообразования. Сечение, в котором точка A будет находиться ближе всего к вершине режущей кромки, будет определять наименьшую глубину внедрения y_{\min} режущей кромки для начала стружкообразования. Автором в работе [13] получено решение для величины y_{\min} для режущей кромки в виде параболоида вращения

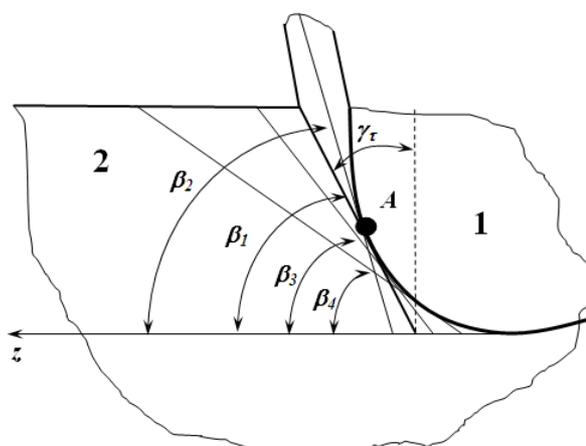


Рисунок 1 – К определению условия стружкообразования

$z^2 + x^2 = B_P^2 \cdot y^{2\nu_P}$ (ось z направлена в сторону вектора скорости резания, ось y – нормально обрабатываемой поверхности, ось x – перпендикулярно этим осям, начало координат O находится в вершине режущей кромки):

$$y_{\min} = (\operatorname{tg}\beta_1 \cdot B_P \cdot \nu_P)^{\frac{1}{1-\nu_P}}.$$

Стружка будет образовываться, если $a_z > y_{\min} > h_{\text{из}}$, где $h_{\text{из}}$ – величина линейного износа режущей кромки. Часть материала, лежащая ниже y_{\min} , не сможет перейти в навалы и будет упрочняться. Если $h_{\text{из}} > y_{\min}$, стружка будет образовываться при любом внедрении a_z , а упрочнение материала будет минимальным.

Геометрические параметры режущих кромок B_P и ν_P могут быть определены по проекциям абразивных зерен.

С учетом (3), условие стружкообразования будет следующим:

$$a_z > \left(\frac{B_P \cdot \nu_P}{2 \cdot ([\delta] + [\psi])} \right)^{\frac{1}{1-\nu_P}} - h_{\text{из}}, \quad (4)$$

где a_z и B_P имеют одинаковые единицы измерения, $\nu_P \in [0, 1)$.

Для частного случая конуса с округленной вершиной, традиционной для теории шлифования, когда по нашим данным $\nu_P = 0,5$, условие стружкообразования упрощается

$$4 \cdot ([\delta] + [\psi]) > \frac{B_P}{\sqrt{a_z + h_{\text{из}}}},$$

Подобное неравенство по разработанной методике может быть выведено для любой формы режущей кромки, как для описанной аналитически, так и той, которую можно смоделировать только численно.

Таким образом, в ходе теоретических исследований на основе важнейшего показателя процесса резания – угла сдвига – предложен критерий стружкообразования при шлифовании, который с учетом как геометрии абразивной режущей кромки, так и физико-механических свойств обрабатываемого материала позволяет, выделив на передней поверхности абразивной режущей кромки зону стружкообразования, установить минимальную глубину внедрения режущей кромки, объем снимаемого материала и оценить качество обработанной поверхности через глубину шлифовочной риски и размеры навалов по ее краям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Snahungshu, S. Analytical model for force prediction when machining metal matrix composites [Text]: a thesis ... of Master of Applied Science / Sikder Snahungshu. – University of Ontario, Institute of Technology, 2010. – 98 p.
2. Армагеро, И.Дж.А. Обработка металлов резанием [Текст] / И.Дж.А. Армагеро, Р.Х. Браун; пер. с англ. В.А. Пастунова. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
3. Малышев, В.И. Очерки истории науки о резании материалов [Текст]: монография / В.И. Малышев. – Тольятти: ТГУ, 2011. – 216 с.
4. Усов, В.П. Стружкообразование при лезвийном резании конструкционных и композитных материалов [Текст]: методические указания / В.П. Усов, В.А. Будаев, С.Н. Велин. – Самара: СамГТУ, 1996. – 42 с.
5. Железнов, Г.С. К вопросу определения угла сдвига при резании металлов [Текст] / Г.С. Железнов // Известия вузов. Машиностроение. – 2000. – № 5-6. – С. 95-101.
6. Кравченко, Б.А. Стружка – источник информации о предыстории процесса резания [Текст] / Б.А. Кравченко // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2000. – № 10. – С. 124-127.
7. Носов, Н.В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08: защищена 27.12.97 / Носов Николай Васильевич. – Самара, 1997. – 452 с.
8. Масленков, С.Б. Жаропрочные стали и сплавы [Текст]: справочное издание / С.Б. Масленков. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с.
9. Козлов, А.С. Формирование микрорельефа при обработке абразивным инструментом [Текст] / А.С. Козлов, В.В. Ефремов // Известия вузов. Машиностроение. – 2004. – № 1. – С. 59-64.

9. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей [Текст] / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
10. Скороходов, С.В. Особенности лезвийной обработки с малыми толщинами среза [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Скороходов Сергей Владимирович. – Иркутск, 2007. – 18 с.
11. Ohbuchi, Y. Surface Generation Model in Grinding with Effect of Grain Shape and Cutting Speed [Text] / Y. Ohbuchi, T. Obukawa // JMSE International Journal. – 2006. – № 1. – Vol. 49. – Series C. – P. 114-120.
12. Осипов, А.П. К вопросу расчета сил при резании единичным абразивным зерном [Текст] / А.П. Осипов // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2004. – № 24. – С. 144-151.

Осипов Александр Петрович

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», филиал в г. Сызрани
Кандидат технических наук, декан механического факультета, зав. кафедрой «Технология машиностроения»
E-mail: mf@mfsyzran.ru

A.P. OSIPOV

**THE SHEAR ANGLE INFLUENCE ON THE CHIP FORMATION
IN GRINDING**

The critical analysis of chip formation criteria and shear angle expressions was carried out. To calculate initial shear angle, the new expression based on equality of the maximum normal stress and the threshold of such normal stress in shear plane was presented. The new chip separation criterion of single grit micro-cutting was suggested.

Keywords: shear angle, single grit micro-cutting, chip separation criterion.

BIBLIOGRAPHY

1. Snahunghu, S. Analytical model for force prediction when machining metal matrix composites [Text]: a thesis ... of Master of Applied Science / Sikder Snahunghu. – University of Ontario, Institute of Technology, 2010. – 98 p.
2. Armagero, I.Dzh.A. Obrabotka metallov rezaniem [Tekst] / I.Dzh.A. Armagero, R.X. Braun; per. s angl. V.A. Pastunova. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 325 s.
3. Maly'shev, V.I. Ocherki istorii nauki o rezanii materialov [Tekst]: monografiya / V.I. Maly'shev. – Tol'yatti: TGU, 2011. – 216 s.
4. Usov, V.P. Struzhkoobrazovanie pri lezviynom rezanii konstrukcionny'x i kompozitny'x materialov [Tekst]: metodicheskie ukazaniya / V.P. Usov, V.A. Budaev, S.N. Velin. – Samara: SamGTU, 1996. – 42 s.
5. Zheleznov, G.S. K voprosu opredeleniya ugla sdviga pri rezanii metallov [Tekst] / G.S. Zheleznov // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. – 2000. – № 5-6. – S. 95-101.
6. Kravchenko, B.A. Struzhka – istochnik informacii o predy'storii processa rezaniya [Tekst] / B.A. Kravchenko // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Seriya «Texnicheskie nauki». – 2000. – № 10. – S. 124-127.
7. Nosov, N.V. Povy'shenie e'ffektivnosti i kachestva abrazivny'x instrumentov putyom napravlenno regulirovaniya ix funkcional'ny'x pokazatelej [Tekst]: dis. ... dokt. texn. nauk: 05.02.08: zashhishhena 27.12.97 / Nikolaj Vasil'evich Nosov. – Samara, 1997. – 452 s.
8. Maslenkov, S.B. Zharoprochny'e stali i splavy' [Tekst]: spravocnoe izdanie / S.B. Maslenkov. – M.: Metallurgiya, 1983. – 192 s.
9. Kozlov, A.S. Formirovanie mikrorel'efa pri obrabotke abrazivny'm instrumentom [Tekst] / A.S. Kozlov, V.V. Efremov // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. – 2004. – № 1. – S. 59-64.
9. Korchak, S.N. Proizvoditel'nost' processa shlifovaniya stal'ny'x detalej [Tekst] / S.N. Korchak. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 280 s.
10. Skoroxodov, S.V. Osobennosti lezviynoj obrabotki s maly'mi tolshhinami sreza [Tekst]: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk: 05.03.01 / Sergej Vladimirovich Skoroxodov. – Irkutsk, 2007. – 18 s.
11. Ohbuchi, Y. Surface Generation Model in Grinding with Effect of Grain Shape and Cutting Speed [Text] / Y. Ohbuchi, T. Obukawa // JMSE International Journal. – 2006. – № 1. – Vol. 49. – Series C. – P. 114-120.
12. Osipov, A.P. K voprosu raschyota sil pri rezanii edinichny'm abrazivny'm zernom [Tekst] / A.P. Osipov // Vestnik SamGTU. Texnicheskie nauki. – 2004. – № 24. – S. 144-151.

Osipov Aleksandr Petrovich

FSBEI HPE “Samara State Technical University”, Syzran Branch, Syzran
Candidate of technical science, dean of Mechanical Faculty, head of department “Machine Building Technology”
E-mail: mf@mfsyzran.ru

Р.В. ГУРОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОУО ППД НА УСИЛИЕ ОБРАБОТКИ И ФОРМИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ

Представлена математическая модель упругого восстановления шероховатости при отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием (ОУО ППД). Проведен анализ влияния некоторых параметров процесса на упругую составляющую рабочего усилия при ОУО ППД и точность описания профиля шероховатости.

Ключевые слова: *поверхностное пластическое деформирование, шероховатость, упругие деформации, рабочее усилие.*

Процесс взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при ОУО ППД носит упруго-пластический характер [1]. При отделочной и отделочно-упрочняющей обработке доля упругих деформаций существенна, а, следовательно, ощутима и степень их влияния на процессы в очаге деформации.

Величина суммарного контактного сближения y_k определяется по зависимости [1]:

$$y_k = y_{пл} + y_{уп}, \quad (1)$$

где $y_{пл}$ и $y_{уп}$ – пластическая и упругая составляющие соответственно.

Для определения доли упругой составляющей $K_{уп}$ в суммарном контактном сближении можно воспользоваться зависимостями из [1], определяющими соотношение между $y_{пл}$ и $y_{уп}$, и выразить из них отношение $y_{уп} / y_k$. После ряда математических преобразований получим выражение:

$$K_{уп} = \frac{2K}{K + \sqrt{K^2 + 4y_k}},$$

где K – коэффициент, учитывающий механические свойства материала и параметры шероховатости поверхности, и определяемый выражением [1]:

$$K = \sqrt{2} \frac{1 - \mu^2}{E} c' k \sigma_T \rho_{ср}^{0,5},$$

где μ – коэффициент Пуассона,
 E – модуль упругости,
 c' – коэффициент стеснения,

σ_T – предел текучести материала,

$\rho_{ср}$ – средний радиус неровностей шероховатости.

Графики зависимости (1) для контактных сближений до 10 мкм и ряда значений среднего радиуса неровности представлен на рисунке 1, а, а на рисунке 1, б – графики абсолютной величины упругого восстановления $y_{уп}$ для тех же диапазонов контактных сближений и радиусов неровностей. В качестве материала принималась условная сталь с $\sigma_T = 950$ МПа.

Так как различные методы обработки при одинаковых значениях высотных параметров дают отличающиеся величины средних радиусов неровностей, то влияние метода предшествующей обработки на величину упругого восстановления очевидно. Так, например, при получении одного и того же параметра шероховатости $Rz 3,5$ точением и шлифованием величина упругой составляющей будет отличаться. При контактном сближении 1,5 мкм, соответствующем отделочно-упрочняющим режимам ОУО ППД, при предварительной обработке шлифованием она составит около 3 % (0,05 мкм), а при предварительной обработке точением около 8 % (0,12 мкм) от величины контактного сближения.

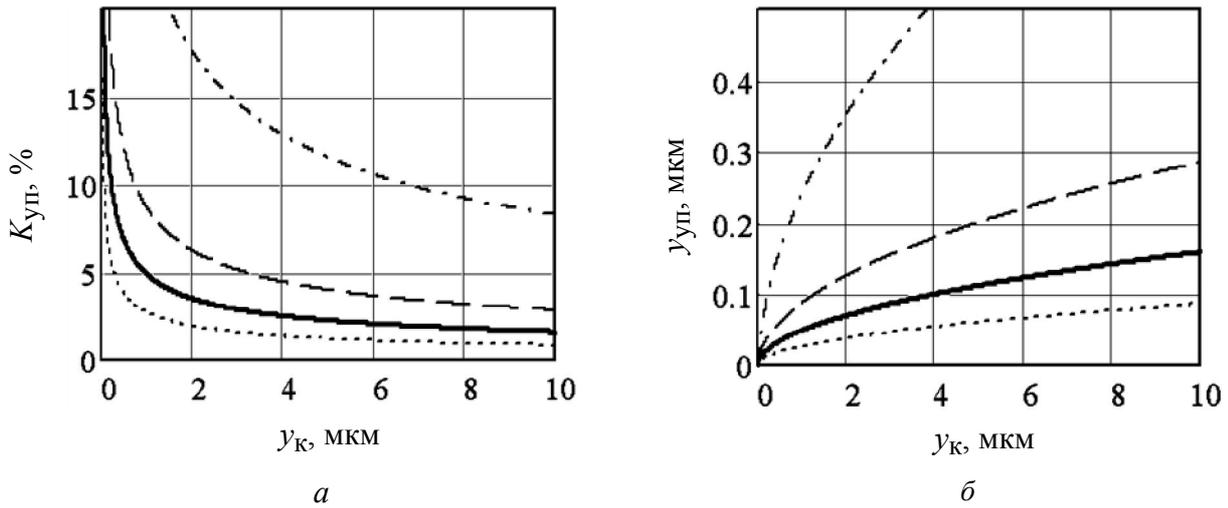


Рисунок 1 – Графики зависимости доли $K_{уп}$ (а) и абсолютного значения $y_{уп}$ упругой составляющей в контактном сближении (б):

..... $\rho_{cp} = 9$ мкм; — $\rho_{cp} = 30$ мкм; - - - $\rho_{cp} = 100$ мкм; - · - · - $\rho_{cp} = 900$ мкм

При деформировании неровностей шероховатости различные точки неровности испытывают отличающиеся величины деформации. Наибольшей контактной деформации подвергаются точки, расположенные у вершины, наименьшей – близкие к впадине. В связи с этим, очевидно, что и упругое восстановление в разных точках неровности будет отличаться. В результате упругого восстановления происходит незначительное изменение профиля шероховатости. Кроме того, при обработке оно оказывает влияние на величину рабочего усилия, поскольку приводит к увеличению площади контакта.

Усилие обработки при упругом восстановлении единичной неровности определяется фактической площадью контакта и контактным давлением. Фактическая площадь контакта с единичной неровностью зависит от ширины контакта при упругом восстановлении b_y (рис. 2). При упругом восстановлении разные точки неровности восстанавливаются на различную величину, следовательно, при одинаковой величине упругого восстановления $y_{уВ}$ (рис. 2) контактное давление в них будет отличаться. Величина $y_{уВ}$ определяется положением инструмента относительно максимального достигнутого контактного сближения y_k .

В каждой точке площадки контакта вдоль оси x давление будет определяться по зависимости:

$$P_k(x) = c'k\sigma_T \left(1 - \frac{y_{уВ}}{y_{упр}(x)} \right),$$

где $y_{упр}(x)$ – зависимость величины максимального упругого восстановления от координаты x , которая имеет вид:

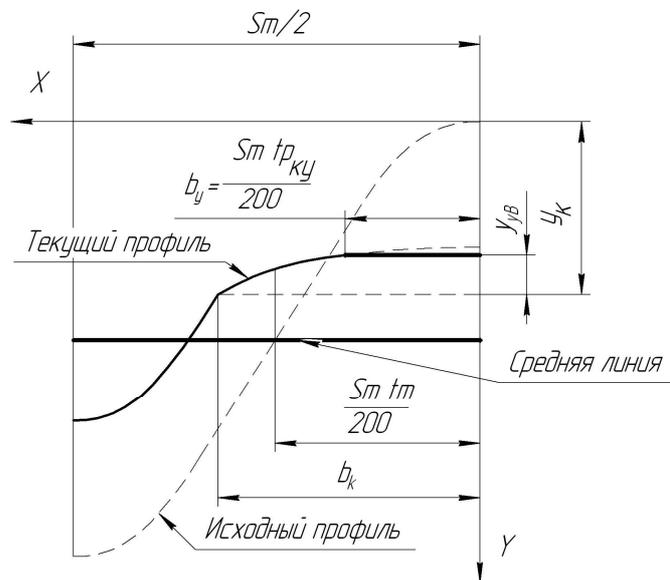


Рисунок 2 – Определение размеров площадки контакта при упругом восстановлении

$$y_{упр}(x) = \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{4(y_k - y_{кН}(x))}{K^2}}}{\frac{2}{K^2}},$$

где $y_{кН}(x)$ – начальное контактное сближение для точки с координатой x , при котором она входит в контакт с инструментом. Зависимости для ее расчета приведены в [2].

Номинальное контактное давление при упругом восстановлении будет определяться интегралом:

$$P_{к.ном} = 2 \int_0^{b_y} P_k(x) dx / S_m = 2 \int_0^{b_y} c' k \sigma_T \left(1 - \frac{y_{уВ}}{y_{упр}(x)} \right) dx / S_m,$$

где x – координата рассматриваемой точки в пределах ширины контакта b_y . Размеры контактной площадки инструмента и неровности b_y при упругом восстановлении определяются по зависимости:

$$b_y = \frac{S_m \cdot tp_{кУ}}{200},$$

где $tp_{кУ}$ – относительная контактная длина при упругом восстановлении, определяется по зависимостям:

$$tp_{кУ} = t_m \left(\frac{y_{кНi} + y_{осНi}}{Rp} \right)^v$$

или

$$tp_{кУ} = 100 - (100 - t_m) \left(\frac{R \max - (y_{кНi} + y_{осНi})}{R \max - Rp} \right)^{v/6}.$$

Величины $y_{осНi}$ и $y_{кНi}$ определяются по зависимостям из [2]. Наличие двух зависимостей обусловлено кусочным описанием профиля шероховатости.

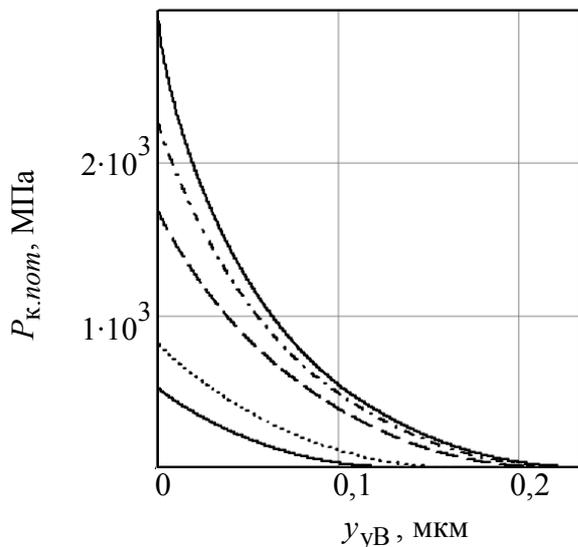


Рисунок 3 – Графики зависимости номинального контактного давления $P_{к.ном}$ от величины упругого восстановления $y_{уВ}$ при достигнутых контактных сближениях.

Снизу вверх: $0,33 Rp$; $0,5 Rp$; $0,85 Rp$; $0,95 Rp$ и $1Rp$

Для анализа полученной модели для схемы обработки «шарик – плоская поверхность» была разработана программа в среде MathCad. Некоторые результаты расчетов с помощью данной программы представлены ниже.

На рисунке 3 представлены графики зависимости номинального давления в контакте от величины упругого восстановления $y_{уВ}$ при некоторых значениях контактного сближения y_k для поверхности с параметрами $Rz = 5$ мкм; $Ra = 1,25$ мкм; $Rp = 2,7$ мкм; $S_m = 0,15$ мм; $t_m = 45$ %, материал – сталь с $\sigma_T = 950$ МПа.

Также были проанализированы составляющие рабочего усилия при следующих условиях. Принимались два набора параметров шероховатости поверхности:

1) $R_z = 5$ мкм; $R_a = 1,25$ мкм; $R_p = 2,7$ мкм; $S_m = 0,15$ мм; $t_m = 45$ %;

2) $R_z = 2,6$ мкм; $R_a = 0,83$ мкм; $R_p = 1,9$ мкм; $S_m = 0,1$ мм; $t_m = 48$ %.

Материал – сталь с $\sigma_T = 950$ МПа.

Диапазон варьирования подачи $S = 0,1 \dots 0,4$ мм/ход, радиус шарика $R = 2,5; 5; 10$ мм, контактное сближение y_k было принято в долях от параметра шероховатости R_p и составило $0,33 R_p; 0,5 R_p$ и $0,85 R_p$.

В результате расчетов были выявлены следующие основные закономерности:

Доля упругой составляющей колеблется от 19 до 29 % от рабочего усилия.

С уменьшением подачи S доля упругой составляющей растет в пределах 1,5...3 %.

С увеличением радиуса R доля упругой составляющей растет в пределах 1,5...3 %.

С уменьшением контактного сближения доля упругой составляющей растет, причем при меньших значениях радиуса инструмента рост более интенсивный: при $R = 10$ мм прирост около 2...2,5 %, а при $R = 2,5$ мм – уже около 5...6 %.

С уменьшением шероховатости доля упругой составляющей растет на 1,5...2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей [Текст] / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

2. Гуров, Р.В. Методология проектирования операций отделочно-упрочняющей обработки деталей машин поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Р.В. Гуров // Вестник БГТУ. – 2010. – № 4. – С.17.

Гуров Роман Владимирович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»

E-mail: msi@tu-bryansk.ru

R.V. GUROV

DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF ELASTIC DEFORMATION AT FINISHING AND HARDENING PROCESSING OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION OF THE EFFORTS OF PROCESSING AND FORMING ROUGHNESS

A mathematical model of elastic recovery roughness during finishing and hardening processing of surface plastic deformation. The influence of some parameters of the elastic component of the work force at finishing and hardening processing surface plastic deformation and accurate description of the profile roughness.

Keywords: surface plastic deformation, surface roughness, elastic deformation, an operating force.

BIBLIOGRAPHY

1. Suslov, A.G. Tekhnologicheskoe obespechenie parametrov sostoyaniya poverxnostnogo sloya detalej [Tekst] / A.G. Suslov. – М.: Mashinostroenie, 1987. – 208 s.

2. Gurov, R.V. Metodologiya proektirovaniya operacij otdelochno-uprochnyayushhej obrabotki detalej mashin poverxnostny'm plasticheskim deformirovaniem [Tekst] / R.V. Gurov // Vestnik BGTU. – 2010. – № 4. – S.17.

Gurov Roman Vladimirovich

Bryansk State Technical University, Bryansk

Candidate of technical science, associate professor of department “Metal-Cutting Machine Tools and Instruments”

E-mail: msi@tu-bryansk.ru

А.В. КИРИЧЕК, Д.Л. СОЛОВЬЕВ, С.А. СИЛАНТЬЕВ, А.В. ПОЛЯКОВ, А.В. ВОЛОБУЕВ

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УПРОЧНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОТВЕРСТИЙ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Предлагается новый способ упрочняющей обработки отверстий с использованием статической и ударной нагрузки, который позволяет увеличить глубину упрочненного слоя и снизить затраты на обработку.

Ключевые слова: *поверхностное пластическое деформирование, статическое воздействие, динамическое воздействие, длинномерные отверстия, глубина упрочненного слоя.*

Для повышения долговечности и несущей способности деталей машин необходимо упрочнение их рабочих поверхностей. Как правило, основной задачей упрочняющей обработки является создание требуемой твердости и глубины упрочненного поверхностного слоя. Достаточно эффективным способом упрочнения является поверхностное пластическое деформирование (ППД), которое позволяет создавать наклепанный поверхностный слой с твердостью до 6500 МПа и глубиной до 3...5 мм и более.

В настоящее время в машиностроении широко используются детали, имеющие внутренние цилиндрические поверхности (например, внутренняя поверхность гильз гидро- и пневмоцилиндров, колец подшипников качения, проушины траков гусеничных машин, отверстия шатунов двигателей внутреннего сгорания и др.), которые, согласно условиям эксплуатации, необходимо подвергать упрочняющей обработке. Однако применение упрочнения ППД для таких поверхностей является сложной технологической задачей, обусловленной их закрытостью и малым диаметром (не более 100...150 мм).

Для деформационного упрочнения небольших отверстий обычно применяется дорнование, при котором инструмент – дорн протягивают или проталкивают под действием статической нагрузки через упрочняемое отверстие, формируя наклепанный слой. Диаметр дорна выполняют больше диаметра упрочняемого отверстия на величину натяга. Наибольшее распространение дорнование получило как способ отделочно-упрочняющей обработки, когда процесс происходит с натягами не более 0,25 мм, а глубина упрочненного слоя не превышает 0,5 мм [1], что не всегда удовлетворяет предъявляемым эксплуатационным требованиям, особенно если деталь при работе испытывает тяжелые нагрузки. Для получения большей глубины упрочнения натяг необходимо увеличивать, что ведет к ухудшению условий прохождения инструмента через отверстие и увеличивает энергоемкость процесса. Поэтому использование классического дорнования отверстий, когда необходимо получение глубины упрочненного слоя более 0,5 мм, часто становится неэффективным.

Одной из возможностей снижения энергозатрат способов ППД является частичная или полная замена статической нагрузки ударной. Разработанный авторами способ статико-импульсной обработки (СИО) имеет возможность воздействовать на упрочняемую поверхность управляемыми ударными импульсами, энергия которых может изменяться в широком диапазоне и создавать в очаге деформации давления необходимые как для отделочно-упрочняющей обработки, так и большие давления необходимые для создания глубокого упрочненного поверхностного слоя. Величина статической составляющей нагрузки при СИО незначительна и предназначена для обеспечения наиболее полной передачи энергии ударных импульсов упрочняемому материалу. Применение СИО для плоских поверхностей позволяет получать упрочненный поверхностный слой с твердостью до 6500 МПа и глубиной до 6...8 мм [2].

Для СИО внутренних цилиндрических отверстий разработан ряд специальных схем, в которых, по аналогии с классическим дорнованием, основными параметрами процесса, оп-

ределяющими показатели качества упрочненной поверхности, будут натяг, форма и размеры инструмента, толщина стенки упрочняемой втулки [3-8].

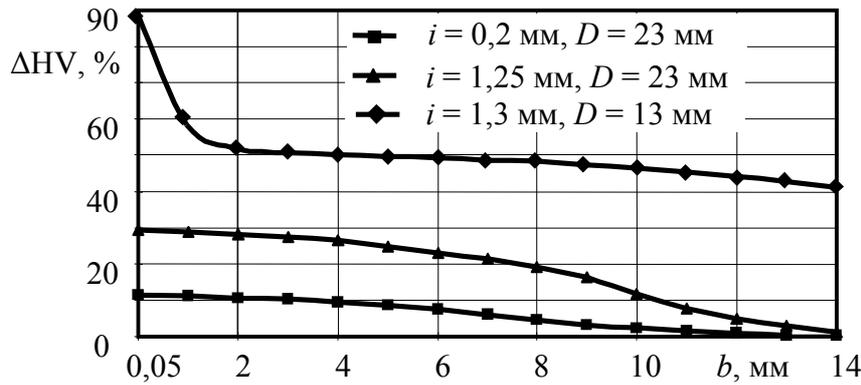
Для того чтобы установить возможности статико-импульсной обработки отверстий были проведены экспериментальные исследования. В качестве инструментов применялись шары от подшипников. Обработка происходила по схеме прошивания, т.е. инструмент (шар) проталкивался через отверстие под действием ударных импульсов и статической нагрузки. Такая схема может применяться только в тех случаях, когда длина отверстия не превышает 100...150 мм, чтобы снизить «уход» оси отверстия, возможный при обработке. Кроме того, широкое применение такой схемы на практике сдерживается тем, что часто достаточно трудно подобрать шар с диаметром, который обеспечивал бы требуемый натяг для данного отверстия. Однако преимуществом использования шаров является отсутствие необходимости изготовления специального инструмента и технологической оснастки, что обычно является сложным и трудоемким процессом и во многом определяет стоимость всей обработки.

Исследования проводились на образцах со следующими размерами: длина отверстия (высота втулки) 50 мм, внутренний диаметр 12...29,5 мм, внешний диаметр 34,5...69,5 мм, т.е. толщина стенки образцов изменялась в диапазоне $b = 7,8...21,7$ мм. Материал образцов – сталь 45, исходная твердость 1800 МПа. Для СИО отверстий были выбраны следующие технологические режимы: энергия ударных импульсов $A = 160$ Дж, частота $f = 18$ Гц, сила статического поджатия $P_{ст} = 40$ кН. Упрочнение происходило шарами диаметром $D = 12,6...33$ мм, при натягах $i = 0,3...1,7$ мм.

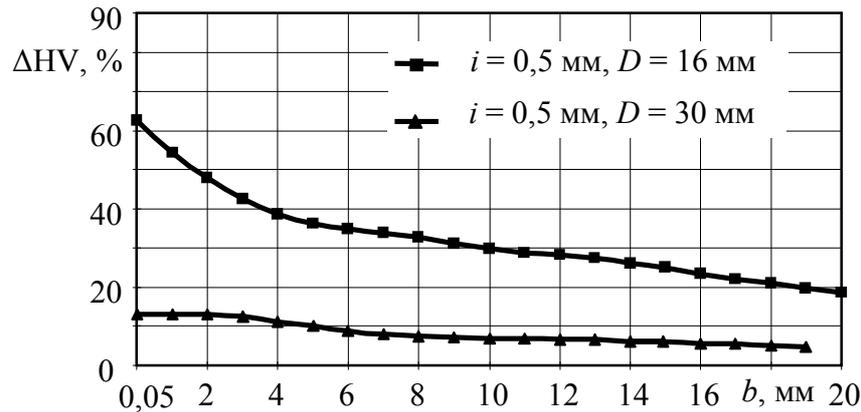
Максимальная степень упрочнения после СИО была зафиксирована на образце с толщиной стенки $b = 14,9$ мм, при обработке шаром диаметром $D = 13$ мм, с натягом $i = 1,3$ мм и составила 90 %. При упрочнении образцов с натягом не менее $i = 0,5$ мм глубина упрочнения распространялась на всю толщину стенки, максимальная величина которой достигала $b = 21,7$ мм. Для образцов с толщиной стенки $b = 10...15$ мм упрочненный слой распространялся по всей ее толщине, а его минимальная степень упрочнения составила не менее 52...42 %.

Установлено, что как и при классическом дорновании, с увеличением натяга происходит более интенсивное пластическое деформирование стенок отверстия, в результате чего повышается глубина и степень упрочнения (рис. 1, а). Так при упрочнении образцов с толщиной стенки $b = 14,6$ мм, шаром диаметром $D = 23$ мм и с натягом $i = 0,2$ мм, максимальная степень упрочнения составила 12 %, а с натягом $i = 1,25$ мм – 30 %. При большем натяге происходит более интенсивное пластическое деформирование по всей толщине стенки упрочненного образца. Так, на глубине 8 мм от края отверстия, упрочненного с натягом $i = 1,25$ мм, твердость была повышена на 20 %, а у отверстия, упрочненного с натягом $i = 0,2$ мм, – не более 5,5 %.

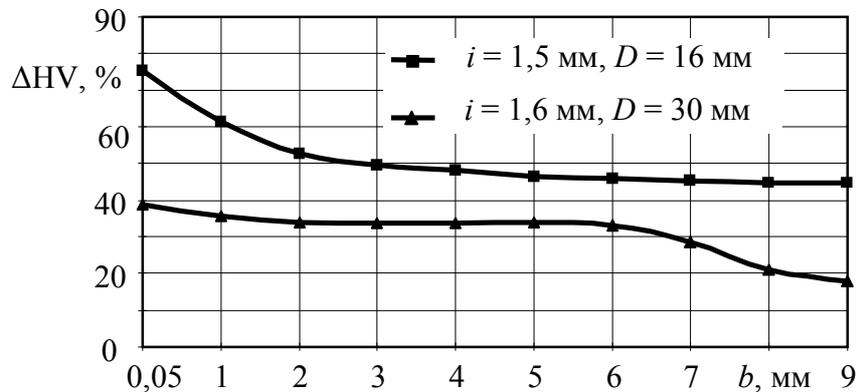
Проведенные исследования показали, что большое влияние на формирование параметров упрочненного поверхностного слоя оказывает изменение диаметра упрочняемого отверстия. Это объясняется тем, что с уменьшением диаметра упрочняемого отверстия и, соответственно, используемого диаметра шара уменьшается площадь контакта шара и упрочняемой поверхности и, соответственно, повышается давление в очаге деформации. Следовательно, уменьшение диаметра упрочняемого отверстия при неизменном натяге и толщине стенки втулки приводит к увеличению степени и глубины упрочнения. Так, при СИО с натягом $i = 1,25...1,3$ мм, образцов с толщиной стенки $b = 14,6...14,9$ мм, шаром диаметром $D = 23$ мм, максимальная степень упрочнения составила 30 %, а шаром $D = 13$ мм – 90 % (рис. 1, а). При упрочнении с натягом $i = 0,5$ мм, образцов с толщиной стенки $b = 19,7...20$ мм, шаром диаметром $D = 30$ мм, максимальная степень упрочнения составила 13 %, а шаром $D = 16$ мм – 62 % (рис. 1, б). При упрочнении с натягом $i = 1,5...1,6$ мм, образцов с толщиной стенки $b = 10$ мм, шаром диаметром $D = 30$ мм, максимальная степень упрочнения составила 40 %, а шаром $D = 16$ мм – 75 % (рис. 1, в).



a)



б)



в)

Рисунок 1 – Изменение степени упрочнения ΔHV по толщине стенки b при упрочнении отверстий СИО с различными натягами i и диаметрами шаров D

Исследованиями установлено, что при СИО отверстий характер распределения степени упрочнения по глубине несколько отличается от полученного при ППД плоских и наружных цилиндрических поверхностей [7, 18]. Для образцов, где деформирование произошло по всей толщине стенки, степень упрочнения от края, ограниченного внутренним диаметром образца, сначала резко снижается до некоторой глубины, а затем практически не изменяется до конца упрочненного слоя, т.е. края, ограниченного внешним диаметром образца. Так, при упрочнении образцов с толщиной стенки $b = 9,8 \text{ мм}$, шаром диаметром $D = 16 \text{ мм}$, с натягом $i = 1,5 \text{ мм}$, максимальная степень упрочнения 75 %, зафиксированная у края, ограниченного внутренним диаметром втулки, резко снижается и на расстоянии 2 мм от края составляет 52 %. Затем, степень упрочнения снижается более плавно и у края втулки, ограниченного внешним диаметром, составляет 45 % (рис. 1, в). При упрочнении образцов с толщиной стенки $b = 14,6 \text{ мм}$, шаром $D = 13 \text{ мм}$, с натягом $i = 1,3 \text{ мм}$, степень упрочнения 90 %, зафикс-

сированная у края, ограниченного внутренним диаметром втулки, также резко снижается до глубины 2 мм, составляя 52 %, после чего происходит ее плавное снижение до 42 %, до края втулки, ограниченного внешним диаметром (рис. 1, а). При упрочнении образцов с большой толщиной стенки $b = 21,7$ мм, шаром диаметром $D = 16$ мм, с натягом $i = 0,5$ мм, характер изменения степени упрочнения становится более похожим на полученный при упрочнении плоских и наружных цилиндрических поверхностей, т.е. становится более равномерным по всей толщине деформированного слоя (рис. 1, б).

ВЫВОДЫ

1) Для повышения степени и глубины упрочнения необходимо увеличивать натяг. При натягах, начиная от 0,5 мм, происходит упрочнение на всю толщину стенки, которая может достигать 21,7 мм. С увеличением диаметра упрочняемых отверстий, а также при уменьшении толщины стенки заготовки, для получения большой глубины и степени упрочнения, натяг необходимо увеличивать.

2) В результате упрочнения СИО отверстий втулок с толщиной стенки 10...15 мм упрочненный слой распространяется по всей толщине стенки, а его минимальная степень упрочнения составила не менее 52...42 %, при этом максимальная степень упрочнения достигала 90 %

3) Установлено, что при СИО отверстий характер распределения степени упрочнения по глубине отличается от полученных при ППД плоских и наружных цилиндрических поверхностей. Максимальная степень упрочнения, расположенная у края, ограниченного внутренним диаметром втулки, резко падает до определенной глубины, а затем изменение степени упрочнения становится более плавным, вплоть до края, ограниченного наружным диаметром втулки. Это особенно выражено с уменьшением толщины стенки втулки.

Исследования выполнены при поддержке гранта МД-5864.2010.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проскуряков, Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов [Текст] / Ю.Г. Проскуряков. – М.: Машиностроение, 1971. – 208 с.
2. Киричек, А.В. Технологические возможности статико-импульсной обработки [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 8. – С. 3-5.
3. Киричек, А.В. Повышение эффективности деформационного упрочнения внутренних цилиндрических поверхностей нагружением пролонгированными ударными импульсами [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. – 2007. – № 1. – С. 45-49.
4. Киричек А.В. Деформационное упрочнение отверстий статико-импульсной обработкой [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 5. – С. 3-5.
5. Поверхностное пластическое деформирование длинномерных отверстий / Д.Л. Соловьев [и др.] // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2010. – № 6-2 (284). – С.115-117.
6. Соловьев, Д.Л. Возможности повышения долговечности траков гусеничных машин деформационным упрочнением [Текст] / Д.Л. Соловьев, А.В. Киричек, М.Н. Медведев // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2011. – № 2 (286). – С.89-92.
7. Киричек, А.В. Исследование влияния параметров статико-импульсного дорнования на глубину упрочненного слоя [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Поляков, Д.Л. Соловьев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. – 2008. – № 3-7. – С. 47-50.
8. Киричек, А.В. Упрочнение отверстий статико-импульсным дорнованием [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.В. Поляков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 6. – С.14-16.

Киричек Андрей Викторович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Доктор технических наук, профессор, директор Технологического института им. Н.Н. Поликарпова
Тел./факс (4862) 55-55-24
E-mail: avk@ostu.ru

Соловьев Дмитрий Львович

Муромский институт Владимирского государственного университета
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Станки и инструмент»
Тел. (49234) 7-71-45
E-mail: murstin@yandex.ru

Силантьев Сергей Александрович

Муромский институт Владимирского государственного университета
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Станки и инструмент»
Тел. (49234) 7-71-45
E-mail: ppdsio@yandex.ru

Поляков Алексей Владимирович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Ассистент Технологического института им. Н.Н. Поликарпова
Тел./факс (4862) 55-55-24
E-mail: tm@ostu.ru

A.V. KIRICHEK, D.L. SOLOV'YOV, S.A. SILANT'EV, A.V. POLYAKOV, A.V. VOLOBUEV

**FEATURES OF FORMATION THE HARDENED SURFACE LAYER
OF HOLES BY STATIC-PULSE PROCESSING**

It is offered new way hardening processing hole with use steady-state and striking load, which allows to enlarge the depth hardening layer and reduce the expenses on processing.

Keywords: surface plastic deformation, static effect, dynamic effect, lengthy holes, depth of the strengthened stratum.

BIBLIOGRAPHY

1. Proskuryakov, Yu.G. *Технология упрочняющей-калибрующей и формообразующей обработки металлов* [Текст] / Yu.G. Proskuryakov. – М.: Mashinostroenie, 1971. – 208 с.
2. Kirichek, A.V. *Технологические возможности статико-импульсной обработки* [Текст] / A.V. Kirichek, D.L. Solov'yov // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2006. – № 8. – С. 3-5.
3. Kirichek, A.V. *Повышение эффективности деформационного упрочнения внутренних цилиндрических поверхностей нагружением пролонгированными ударными импульсами* [Текст] / A.V. Kirichek, D.L. Solov'yov // *Известия ОрелГТУ. Mashinostroenie*. – 2007. – № 1. – С. 45-49.
4. Kirichek A.V. *Деформационное упрочнение отверстий статико-импульсной обработкой* [Текст] / A.V. Kirichek, D.L. Solov'yov // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2007. – № 5. – С. 3-5.
5. *Поверхностное пластическое деформирование длинномерных отверстий* / D.L. Solov'yov [и др.] // *Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»*. – 2010. – № 6-2 (284). – С.115-117.
6. Solov'yov, D.L. *Возможности повышения долговечности траков гусеничных машин деформационным упрочнением* [Текст] / D.L. Solov'yov, A.V. Kirichek, M.N. Medvedev // *Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»*. – 2011. – № 2 (286). – С.89-92.
7. Kirichek, A.V. *Исследование влияния параметров статико-импульсного дорнования на глубину упрочняющего слоя* [Текст] / A.V. Kirichek, A.V. Polyakov, D.L. Solov'yov // *Известия ОрелГТУ. Mashinostroenie. Priborostroenie*. – 2008. – № 3-7. – С. 47-50.
8. Kirichek, A.V. *Упрочнение отверстий статико-импульсным дорнованием* [Текст] / A.V. Kirichek, D.L. Solov'yov, A.V. Polyakov // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2009. – № 6. – С.14-16.

Kirichek Andrej Viktorovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel
Doctor of technical science, professor, director of Technological Institute named after N.N. Polikarpov
Tel./fax (4862) 55-55-24
E-mail: avk@ostu.ru

Solov`yov Dmitrij L`vovich

Murom Institute of the Vladimir State University, Murom

Doctor of technical science, professor, professor of department "Machine Tools and Instruments"

Tel. (49234) 7-71-45

E-mail: murstin@yandex.ru

Silant`ev Sergej Aleksandrovich

Murom Institute of the Vladimir State University, Murom

Candidate of technical science, associate professor of department "Machine Tools and Instruments"

Tel. (49234) 7-71-45

E-mail: ppdsio@yandex.ru

Polyakov Aleksej Vladimirovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University – Education-Science-Production Complex", Orel

Assistant of Technological Institute named after N.N. Polikarpov

Tel./fax (4862) 55-55-24

E-mail: tm@ostu.ru

М.И. КОРНЕВА, В.Б. ПРОТАСЬЕВ

ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛАТУНИ КОМБИНИРОВАННЫМ ФАСОННЫМ РЕЖУЩЕ-ДЕФОРМИРУЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

Рассмотрены основные особенности процесса отделочной обработки латунных деталей в серийном производстве, а также представлены направления последующего его изучения для проектирования комбинированного фасонного инструмента.

Ключевые слова: *протяжка, штамповка, чистота поверхности, режимы резания, геометрия режущего клина, обрабатываемый материал.*

При производстве изделий водоразборной арматуры на предприятии ООО «Аркон» возникла необходимость в отыскании принципиально новых технических решений по отделочной обработке деталей, требующих полировочной операции и имеющих большой объем выпуска, в частности детали «Гайка соединительная», которая представлена на рисунке 1.

Наружный шестигранник гайки является базой для обработки внутреннего отверстия и нарезания в нем резьбы М27×1,5, которая должна быть соосна базовой поверхности. Заготовкой является латунная (ЛЦ40 Сд ГОСТ 17711-80) отливка, полученная литьем под давлением в многоместные пресс-формы. Объем выпуска составляет более миллиона деталей в год. Точность изготовления отливок невысока и вызывает нарекания в цехе механической обработки. Особенно это касается размеров наружного шестигранника и внутреннего отверстия, а также их расположения относительно друг друга.

На предприятии используется ручная полировка видимых поверхностей детали, которая характеризуется тяжелыми условиями труда и повышенной вредностью. А без полировки последующее хромирование не обеспечивает стабильности по прочности покрытия.

Перед технологами предприятия ООО «Аркон» была поставлена задача повысить чистоту наружной поверхности гайки без использования полировочных операций при минимальных затратах и высокой производительности процесса. Помимо этого, необходимо обеспечить правильную форму наружного шестигранника и тем самым обеспечить базу для последующей механической обработки, а также снизить несоосность расположения внутренней и наружной поверхности.

Комбинированный инструмент [1], разработанный для решения этой задачи, представляет собой (рис. 2) сочетание режуще-выглаживающей протяжки и штампа.

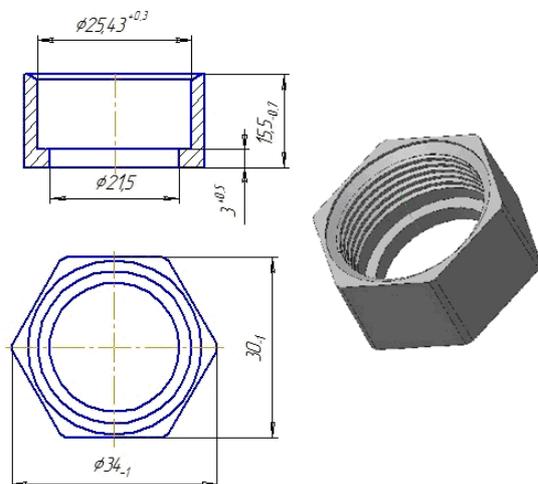


Рисунок 1 – Гайка соединительная

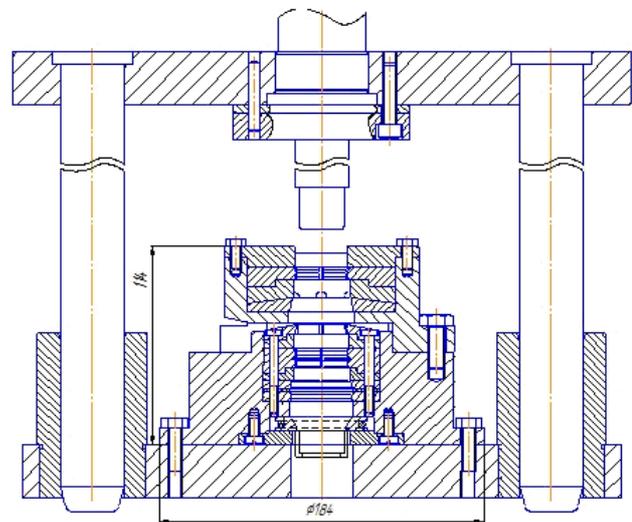


Рисунок 2 – Комбинированный инструмент

В ходе его испытаний, показавших работоспособность инструмента, были выявлены недостатки, снижающие стабильность выходных характеристик обработанной детали. Эти недостатки в значительной степени связаны с тем, что все элементы инструмента были выбраны конструктивно.

Для устранения недостатков требуется найти теоретически и практически обоснованные значения таких параметров как углы заточки режущей части инструмента и форма рабочей части выглаживающей матрицы, припуски на обработку, скорость резания, а, главное, натяг в системе. Под натягом в данном случае следует понимать разницу между размерами шестигранника детали и шестигранника первой, буферной, обжимающей матрицы (рис. 3). Оптимальное значение натяга позволит уточнить форму внутреннего отверстия, за счет прилегания его поверхности к поверхности пуансона и самого шестигранника.

При рациональном назначении натяга i (рис. 3) зазор Δ будет минимальным. Это позволит стабилизировать припуск на режущие зубья, а значит увеличить стойкость инструмента, выровнять положение заготовки на пуансоне и, в конечном итоге, обеспечить стабильность работы спроектированного инструмента.

Совокупность обоснованно выбранных решений позволит получить поверхность с заданной шероховатостью и обеспечить при этом соосность наружного шестигранника и внутреннего отверстия, не повредив форму последнего.

Характерной особенностью работы протяжек, срезающих стружку по профильной схеме, является то, что обрабатываемая поверхность образуется главными режущими кромками зубьев. Поэтому все неровности лезвий, возникающие при заточке протяжек и при их износе, не только копируются на обработанную поверхность, но и значительно возрастают вследствие явлений, связанных с деформацией обрабатываемого металла в процессе резания. Кроме того, на чистоту обработанной поверхности при протягивании оказывает влияние геометрия режущих элементов, режимы резания, смазочно-охлаждающие технологические средства, обрабатываемый материал и прочие факторы. Обработанные режущими протяжками поверхности, как правило, бывают покрыты продольными царапинами той или иной глубины, а также более или менее широкими полосками с поперечными следами надрыва металла.

Эти дефекты поверхности наблюдались при начальных испытаниях процесса на токарном станке с использованием плоской наружной протяжки. Опытные работы показали, что следы режущих зубьев, практически не различимые на латуни, становятся заметными после нанесения покрытия. Зеркально чистые поверхности можно получить преимущественно выглаживающими зубцами. В результате в рассматриваемом комбинированном инструменте предусмотрены рабочие части как режущие, так и выглаживающие, аналогичные по своей конструкции наружной протяжке. А значит такие параметры как стойкость инструмента, скорость резания, углы заточки следует определять, исходя именно из этого.

Износ режущих элементов протяжек снижает чистоту образуемых ими поверхностей. Поэтому критерием затупления протяжек обычно принимается такая величина износа, при которой чистота обработки начинает не удовлетворять предъявляемым требованиям. Согласно работе [2], для протяжек, предназначенных для обработки поверхностей с параметром шероховатости $Ra\ 0,063\ \mu\text{м}$, это происходит в большинстве случаев при средней ширине истирания задних граней $0,08-0,1\ \text{мм}$, включающим и округление лезвий.

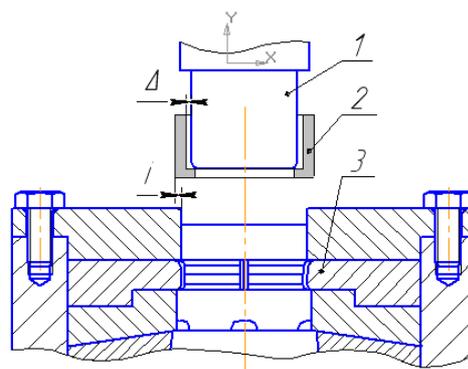


Рисунок 3 – Схема распределения натяга:
 1 – пуансон; 2 – гайка; 3 – буферная секция;
 Δ – исследуемый зазор; i – рассчитываемый натяг

Использование инструмента предполагается на гидравлическом прессе со скоростью 4 м/мин при использовании автоматической загрузки заготовок и охлаждении (продуве) штампа сжатым воздухом с масляной эмульсией.

Сжатый воздух эффективно охлаждает и смазывает режущие элементы, не позволяет стружке вторично попасть в зону резания.

Согласно работе [3] латуни относятся к IV группе обрабатываемости. Стойкость протяжки [4] измеряется в метрах обработанной поверхности и рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{C_T}{V^n \cdot S_z^y},$$

где при $C_T = 339$; $V = 4$ м/мин; $S_z = 0,05$ мм; $n = 0,41$; $y = 0,13$:

$$T = \frac{339}{4^{0,41} \cdot 0,05^{0,13} \cdot 1000} \approx 283 \text{ м.}$$

Такая стойкость соответствует обработке 24 000 деталей, что удовлетворяет предприятие. Но для ее реализации не менее важна стабильность работы инструмента.

В рассматриваемом варианте предполагается менее интенсивный износ, поскольку стружкоделительные канавки не используются, а возникающий наклеп повышает обрабатываемость латуни ЛЦ 40Сд.

Определить рациональные значения всех выше перечисленных параметров процесса из рекомендуемого диапазона позволяет методика Г. Тагути (так называемое робастное проектирование) [4], с учетом опыта первых испытаний инструмента.

Согласно рекомендациям этой работы составлена таблица 1, так называемых, управляемых и дестабилизирующих параметров, которые разделены на уровни.

Таблица 1 – Значения управляемых и дестабилизирующих параметров

Управляемый параметр		Значения параметров	
		Уровень 1	Уровень 2
A	Охлаждение	воздух	НГЛ-205
B	Передний угол, град	12	0
C	Количество режущих элементов	1	2
D	Припуск на обработку режущих элементов	0,1	0,25
E	Количество выглаживающих элементов	2	3
F	Закрепление пуансона	плавающее	жесткое
G	Диаметр пуансона	25,5	25,6
H	Радиус скругления режущей кромки	нет	есть
Параметры, принятые постоянными			
1	Материал режущих элементов	У10А	
2	Задний угол режущих элементов	12°	
3	Припуск на буферную секцию	0,1 мм	
4	Скорость резания	10 мм/мин	
Дестабилизирующие параметры			
a	Точность исполнения заготовки (несоосность шестигранника и внутреннего отверстия)	0,2	0,5

В программе STATISTICA 6.0 выбрана ортогональная матрица (табл. 2), предусматривающая выполнение 16 опытов, каждый из которых дублируется 4 раза.

Таблица 2 – Управляемая матрица эксперимента

№ опыта	Управляемый параметр								Дестабилизирующий параметр
	A	B	C	D	E	F	G	H	
									a
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	1	1	2	2	1
4	1	1	2	2	2	2	1	1	2
5	1	2	1	2	1	2	1	2	1
6	1	2	1	2	2	1	2	1	2
7	1	2	2	1	1	2	2	1	1
8	1	2	2	1	2	1	1	2	2
9	2	1	1	2	1	2	2	1	2
10	2	1	1	2	2	1	1	2	1
11	2	1	2	1	1	2	1	2	2
12	2	1	2	1	2	1	2	1	1
13	2	2	1	1	1	1	2	2	2
14	2	2	1	1	2	2	1	1	1
15	2	2	2	2	1	1	1	1	2
16	2	2	2	2	2	2	2	2	1

Выбор наилучшего сочетания параметров будет выполняться по максимальной величине критерия Тагути «сигнал/шум» по формуле:

$$T = \lg \left(\frac{\bar{X}}{\Delta} \right),$$

где \bar{X} – среднеарифметическое значение исследуемого параметра, например соосности наружной и внутренней поверхности, в конкретном опыте (сигнал);

Δ – изменчивость этого параметра в этом же опыте при его четырехкратном повторении (шум).

Эффективность метода робастного проектирования позволит определить искомое сочетание факторов и выявить тенденцию улучшения качества спроектированного инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сотова, Б.И. Отделочная обработка наружных шестигранных поверхностей на деталях из латуни специальным комбинированным инструментом [Текст] / Б.И. Сотова, М.И. Корнева // Вестник ТулГУ. Серия Инструментальные и метрологические системы. «Инструментальные системы машиностроительных производств»: материалы Международной юбилейной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения С.С. Петрухина. Тула, 29-31 октября 2008 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – С. 56.
2. Грановский, Г.И. Резание металлов [Текст]: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
3. Щеголев, А.В. Конструирование протяжек [Текст] / А.В. Щеголев. – М.-Л.: Машгиз, 1960. – 352 с.
4. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути. [Текст] / Леон Р. [и др.]; пер с англ. – М.: «СЕЙФИ», 2002. – 384 с.
5. Маргулис, Д.К. Протягивание для обработки отверстий [Текст] / Д.К. Маргулис [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.

Корнева Мария Игоревна

Тулльский государственный университет, г. Тула
 Аспирант
 Тел. 8-910-700-47-85
 E-mail: kormarig@mail.ru

Протасьев Виктор Борисович

Тульский государственный университет, г. Тула

Доктор технических наук, профессор

Тел. 8-920-751-80-12

M.I. KORNEVA, V.B. PROTAS'EV

OPTIMIZATION PROBLEM OF FINISH MASCHINING OF BRASS COMBINATION SHAPED CUTTING-DEFORMABLE TOOLS

The main features of the process of finishing processing brass parts in mass production, and provides further direction of his study for the design of the combined shapes tool.

Keywords: broaching, stamping, surface finish, cutting conditions, cutting wedge geometry, the material being processed.

BIBLIOGRAPHY

1. Sotova, B.I. Otdelochnaya obrabotka naruzhny'x shestigranny'x poverxnostej na detalyax iz latuni special'ny'm kombinirovanny'm instrumentom [Tekst] / B.I. Sotova, M.I. Korneva // Vestnik TulGU. Seriya Instrumental'ny'e i metrologicheskie sistemy'. Materialy' Mezhdunarodnoj yubilejnoj nauchno-texnicheskoj konferencii «Instrumental'ny'e sistemy' mashinostroitel'ny'x proizvodstv», posvyashhyonnoj 105-letiyu so dnya rozhdeniya S.S. Petrukhina. Tula, 29-31 oktyabrya 2008 g. – Tula: Izd-vo TulGU, 2008. – S. 56.
2. Granovskij, G.I. Rezanie metallov [Tekst]: uchebnyy dlya mashinostr. i priborostr. spec. vuzov / G.I. Granovskij, V.G. Granovskij. – M.: Vysshaya shkola, 1985. – 304 s.
3. Shhyogolev, A.V. Konstruirovaniye protyazhek [Tekst] / A.V. Shhyogolev. – M.-L.: Mashgiz, 1960. – 352 s.
4. Upravlenie kachestvom. Robastnoye proektirovaniye. Metod Taguti. [Tekst] / Leon R. [i dr.]; per s angl. – M.: «SEJFI», 2002. – 384 s.
5. Margulis, D.K. Protyagivaniye dlya obrabotki otverstij [Tekst] / D.K. Margulis [i dr.]. – M.: Mashinostroeniye, 1986. – 232 s.

Korneva Mariya Igorevna

Tula State University, Tula

Postgraduate student

Tel. 8-910-700-47-85

E-mail: kormarig@mail.ru

Protas'ev Viktor Borisovich

Tula State University, Tula

Doctor of technical science, professor

Tel. 8-920-751-80-12

УДК 621.914.5

Ю.Н. СТЕБЛЕЦОВ, А.С. ТАРАПАНОВ, Г.А. МИХАЙЛОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПЕРЕДАЧИ НОВИКОВА

В статье приводятся значения составляющих силы резания, полученные экспериментально, при обработке зубчатых колес передачи Новикова червячными фрезами и методика их определения с использованием универсального динамометра.

Ключевые слова: составляющие силы резания, червячная фреза, зубчатые передачи Новикова, экспериментальные исследования.

С момента появления зацепления Новикова, выполнено значительное количество исследований теоретического и экспериментального характера. Хорошая прирабатываемость зацепления способствует повышению контактной прочности. Внедрение таких передач приводит к повышению нагрузочной способности, долговечности силового привода, либо к снижению массы редукторов. Достоинства зацепления в ряде случаев могут быть реализованы лишь при надлежащем качестве изготовления колес [1]. Несмотря на это, технология производства таких зубчатых передач осталась не достаточно разработана, отсутствуют сведения в общедоступной российской справочной литературе по оптимальным режимам обработки. При назначении режима обработки червячным фрезам, для получения зубчатых колес передачи Новикова ориентируются на обычные модульные фрезы. В этой связи разработка технологии производства таких передач является актуальной темой исследования.

Для изучения сил, возникающих при нарезании зубьев инструментами червячного типа, было разработано математическое отображение схемы резания, являющееся стержнем системной методики расчетов режущей части инструмента (производящей поверхности, режущих кромок) и параметров процесса резания. Численный анализ сил резания включает определение рабочих углов червячной фрезы и параметров срезаемого слоя [2].

Целью является исследование составляющих силы резания и амплитуды их колебания: определение силы резания, действующей на инструмент, и выявление экспериментальной зависимости между ней и режимами обработки.

Универсальный динамометр (УДМ-600) предназначен для измерения статических и динамических деформаций, возникающих в процессе обработки. Задающим элементом являются тензометрические датчики. С помощью примененного универсального динамометра можно исследовать мгновенные значения силы резания в диапазоне частот от 0 до 500 Гц.

УДМ-600 способен одновременно воспринимать три составляющие силы резания P_x , P_y и P_z и крутящий момент $M_{кр}$. Обозначение сил, измеряемых динамометром, совпадают с обозначением составляющих сил резания, изображенных на рисунке 1. Динамометр измеряет крутящий момент $M_{кр}$, действующий в горизонтальной плоскости. Работа динамометра основана на регистрации изменений значений сопротивлений тензометрических датчиков, вызванных действием измеряемой силы. Внутри динамометра расположена державка, выполненная в виде квадратной пластины с круглым фланцем для крепления к ней сменных приспособлений. Державка установлена на шестнадцати упруго деформируемых опорах. Конструкция опор такова, что жесткость опоры вдоль ее оси примерно в 100 раз меньше жесткости в поперечном направлении. К каждой опоре вдоль ее оси приклеен проволочный тензорезистор с номинальным сопротивлением 200 Ом. Расположение опор в динамометре и схема соединений тензорезисторов с обозначением номеров контактов на разъеме динамометра показаны на рисунке 1. Такое соединение тензорезисторов позволяет создавать разные измерительные схемы.

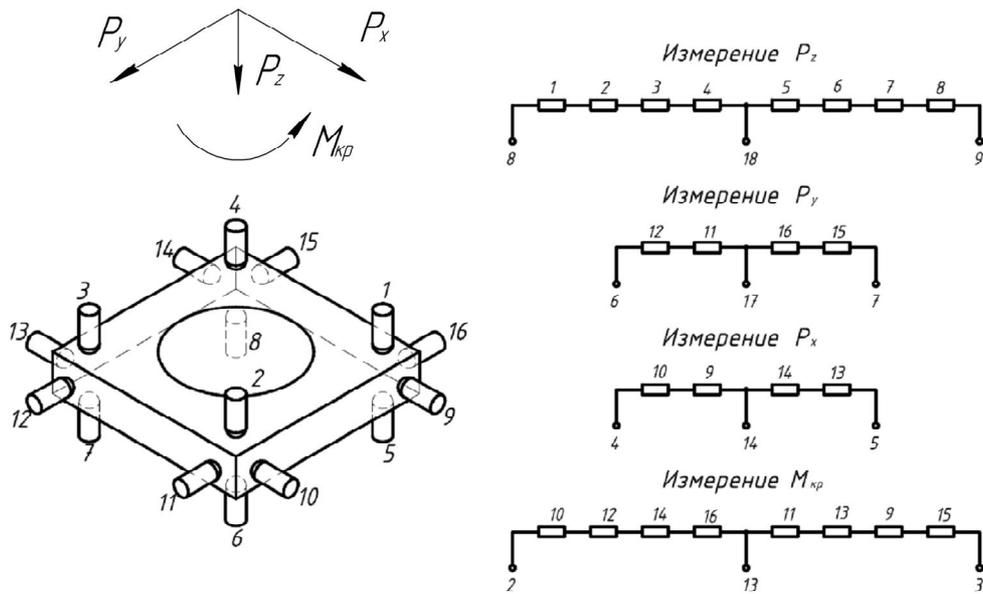


Рисунок 1 – Расположение опор в динамометре и схемы соединения тензорезисторов

В изготовленном устройстве измерения сил используется мостовая схема измерения Уитсона. Тензорезисторы динамометра УДМ-600, соединенные по схемам на рисунке 1, подключаются к плате балансировочных сопротивлений (ПБС). На ПБС смонтированы постоянные и переменные подстроечные резисторы, которые образуют с тензорезисторами динамометра-датчика мостовые схемы измерения, приведенные на рисунке 2.

На рисунке 2, а приведены мостовые схемы соединения резисторов для измерения составляющей силы резания P_z и крутящего момента $M_{кр}$, на рисунке 2, б приведена схема для измерения составляющих сил резания P_x и P_y . Плечи I и III образованы последовательным соединением тензорезисторов динамометра-датчика, плечи II и IV состоят из балансировочных сопротивлений.

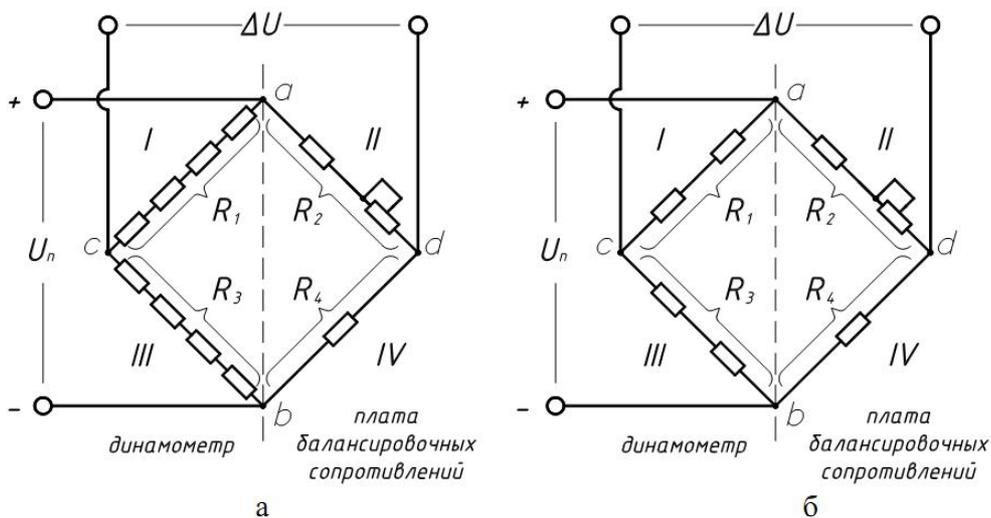


Рисунок 2 – Мостовые схемы измерения составляющих сил резания

После установки и закрепления динамометра-датчика на столе станка, устройства, необходимые для измерения, были соединены по схеме (рисунок 3).

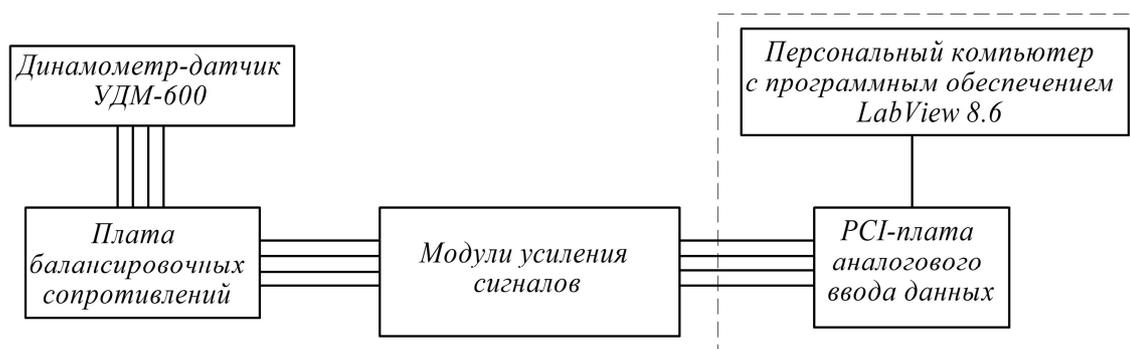


Рисунок 3 – Структурная схема взаимодействия составных частей измерительного стенда для измерения сил резания

Система работает следующим образом. Сигналы от тензодатчиков, наклеенных на упругие элементы динамометра, поступают на усилители тензодатчиков SG-3016, работающих от напряжения 15 В, после чего сигналы с усилителей подаются на плату АЦП персонального компьютера, которая непосредственно передает сигналы программному обеспечению LabView. С помощью программного приложения на мониторе ПК отображаются кривые эквивалентные силам резания.

Продолжительность эксперимента на разработанной установке составляет несколько минут. Перед измерением сил резания проводится тарирование динамометра в статическом состоянии путем нагружения (поочередного) в направлении действия составляющих силы резания и фиксируется показание виртуального осциллографа в среде LabView по этой составляющей.

На рисунке 5, а изображен динамометр 3, на котором установлена сегментная заготовка 2, являющаяся частью колеса большого диаметра, что позволяет снизить стоимость экспериментальных работ. При такой установке заготовки ось динамометра не совпадает с осью стола зубофрезерного станка. На рисунке 5, б показана установка цилиндрической заготовки 2, имеющей небольшой наружный диаметр. В этом случае ось динамометра 3 совпадает с осью стола станка [3].

Цилиндрическую поверхность сегментной заготовки, установленной на динамометре, можно получать перед их обработкой червячной фрезой непосредственно на зубофрезерном станке. Это позволит уменьшить погрешность при измерении сил резания.

Динамометр при резании регистрирует силы P''_x , P''_y и P_z .

Из рисунка 5 определяем величину и направление равнодействующей силы:

$$Q = \sqrt{(P''_x)^2 + (P''_y)^2}; \quad (1)$$

$$\sigma = \arctg \frac{P''_y}{P''_x}. \quad (2)$$

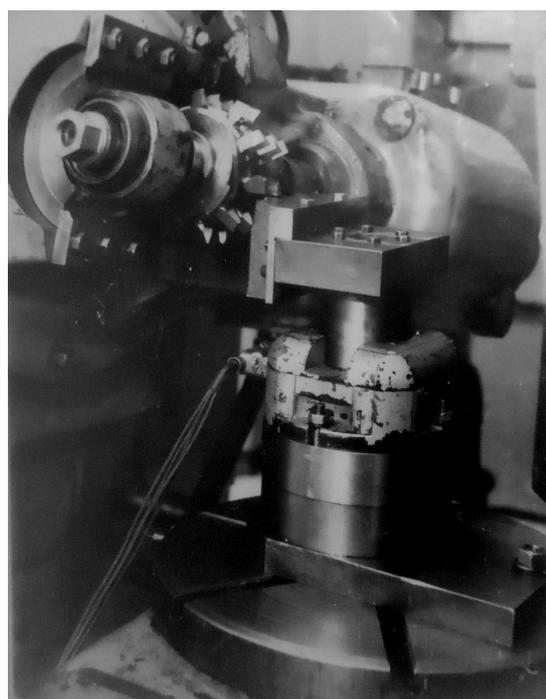


Рисунок 4 – Установка для определения составляющих силы резания при зубофрезеровании сегмента цилиндрического колеса

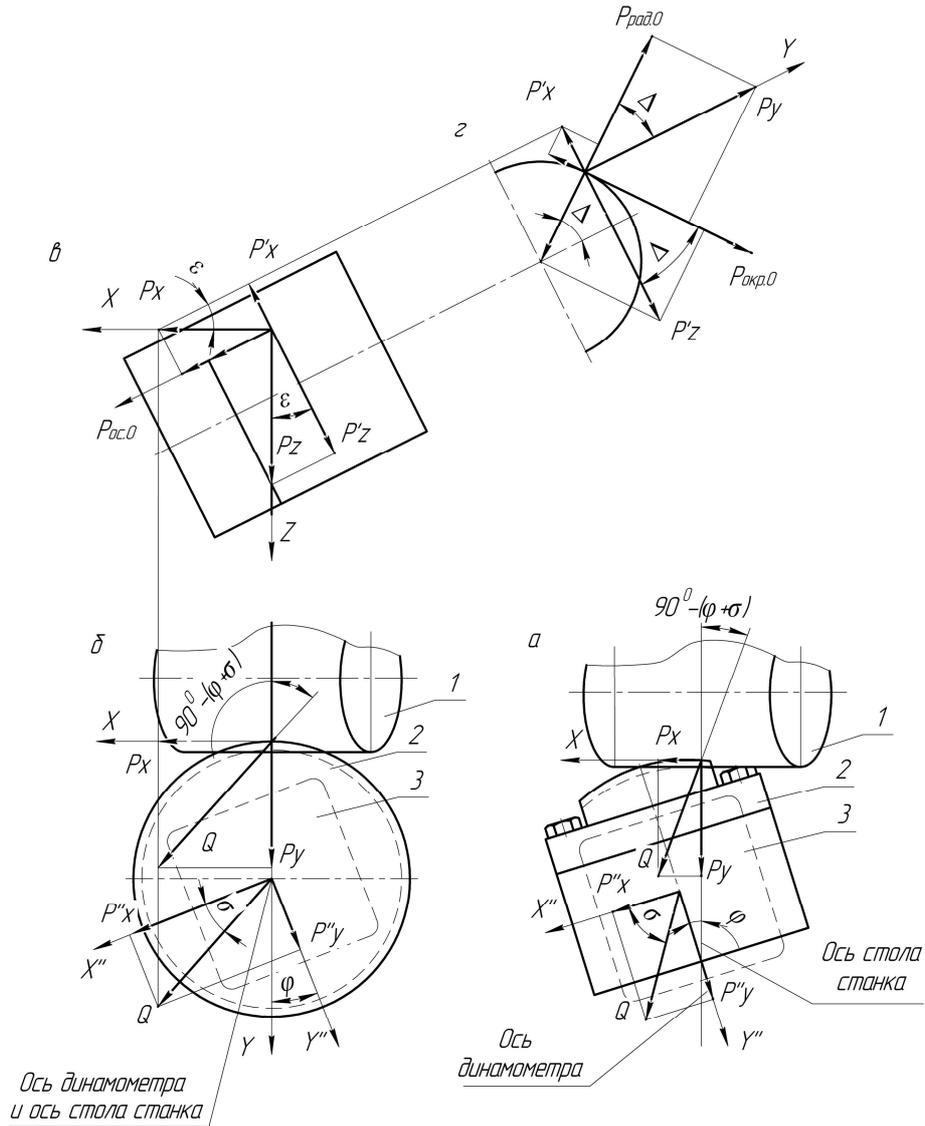


Рисунок 5 – Схема для определения составляющих сил резания при зубофрезеровании цилиндрических колес:

а – заготовка сегментная; б – заготовка цилиндрическая;
1 – фреза; 2 – заготовка; 3 – динамометр

Силы P_x и P_y , действующие на зубчатое колесо, находятся по следующим формулам:

$$P_x = Q \cdot \cos(\varphi + \sigma); \quad P_y = Q \cdot \sin(\varphi + \sigma). \quad (3)$$

Максимальный угол контакта (рис. 5, г) между червячной фрезой и зубчатым колесом находится по известной приближенной зависимости:

$$\Delta = \arccos\left(\frac{r_{ao} - t}{r_{ao}}\right). \quad (4)$$

где r_{ao} – наружный радиус червячной фрезы;

t – глубина фрезерования (глубина обрабатываемой впадины).

Из рисунка 5 определяем действующие на червячную фрезу при попутной подаче составляющие силы резания: $P_{окр.0}$ – окружная, $P_{рад.0}$ – радиальная, $P_{ос.0}$ – осевая:

$$P_x' = P_x \cdot \sin \varepsilon; \quad P_z' = P_z \cdot \sin \varepsilon. \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_{окр.0} &= P_z' \cdot \cos \Delta \mp P_x' \cdot \cos \Delta \pm P_y \cdot \sin \Delta = \\ &= P_z \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \Delta \mp P_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \Delta \pm P_y \cdot \sin \Delta; \end{aligned} \quad (6)$$

$$P_{\text{рад.0}} = -P_z' \cdot \cos(90^\circ - \Delta) \pm P_y \cdot \cos \Delta \pm P_x' \cdot \sin \Delta =$$

$$= -P_z \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin \Delta \pm P_y \cdot \cos \Delta \pm P_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \Delta; \quad (7)$$

$$P_{\text{ос.0}} = P_z \cdot \sin \varepsilon \pm P_x \cdot \cos \varepsilon. \quad (8)$$

где $\varepsilon = \omega \pm \beta$ – угол поворота оси фрезы относительно горизонтальной плоскости (знак «+» берется при разноименном направлении винтовых линий червячной фрезы и зубчатого колеса, знак «-» берется – при одноименном направлении),

ω – угол подъема витков фрезы;

β – угол наклона винтовой линии заготовки [3].

Аналогичным образом выводятся формулы для сил $P_{\text{окр.0}}$, $P_{\text{рад.0}}$ и $P_{\text{ос.0}}$ при встречной подаче:

$$P_{\text{окр.0}} = P_z \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \Delta \mp P_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \Delta \mp P_y \cdot \sin \Delta; \quad (9)$$

$$P_{\text{рад.0}} = P_z \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin \Delta \mp P_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \Delta \pm P_y \cdot \cos \Delta; \quad (10)$$

$$P_{\text{ос.0}} = P_z \cdot \sin \varepsilon \pm P_x \cdot \cos \varepsilon. \quad (11)$$

Нижние знаки перед P_y и P_x берутся, если эти силы направлены в противоположную сторону, изображенную на рисунке 5.

Заготовки для исследования необходимо отбирать из одной партии поставки и перед опытами проверять на твердость для более полного исключения влияния колебаний твердости и химического состава заготовок на погрешности измерения силы резания.

Чтобы исключить влияние забоин и царапин режущего лезвия на погрешность измерений, перед опытами режущий инструмент осматривается под микроскопом. Износ на задней боковой поверхности зубьев допускается не более 0,03 мм.

Представленная методика позволяет определить составляющие силы резания, действующие как в целом на червячную фрезу, так и на отдельные зубья, а также уменьшить расходы вследствие применения сборных заготовок.

Программой экспериментальных исследований предусматривалось измерение трех взаимно перпендикулярных составляющих силы резания при обработке зубчатых колес из стали 45 ГОСТ 1050-88, $m = 3$, $z_1 = 30$, $\beta = 20^\circ$;

На рисунке 6 приведены данные полученные при проведении эксперимента.

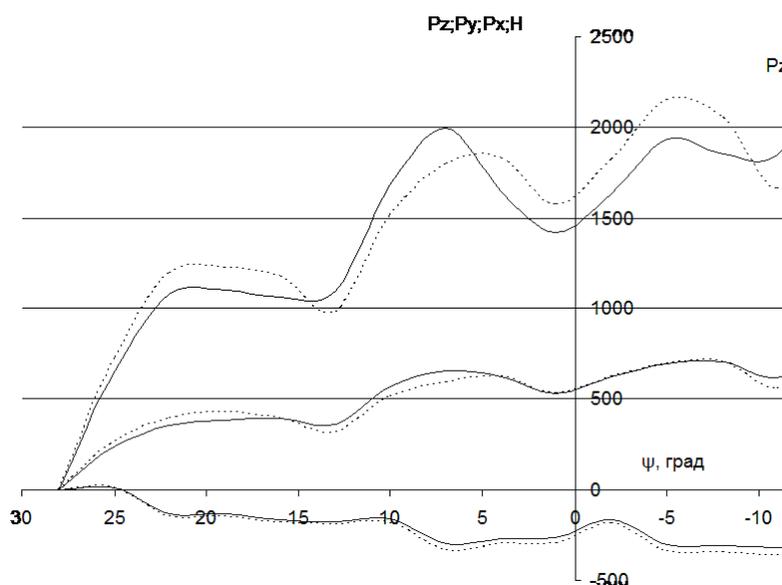


Рисунок 6 – Суммарное изменение составляющих силы резания:

$n_0 = 98$ об/мин; $S_0 = 1,5$ мм/об; $z_0 = 10$; $m = 3$ мм; $z_1 = 30$.

Силы резания: ———— – расчетные, ······ – экспериментальные

Разница между теоретически определенными и экспериментальными силами резания не превышает 10%, что позволяет сделать вывод об адекватном разработанном математическом отображении схемы резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стеблецов, Ю.Н. Определение сил резания процесса нарезания зубчатых колес передачи Новикова червячными фрезами [Текст] / Ю.Н. Стеблецов, А.С. Тарапанов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 5-2. – С. 31-35.
2. Стеблецов, Ю.Н. Разработка математического отображения схемы резания зубчатых колес передачи Новикова червячными фрезами [Текст] / Ю.Н. Стеблецов, А.С. Тарапанов // «Научный потенциал Орловщины в модернизации промышленного комплекса малых городов России»: материалы научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов. – Орел: Орел ГТУ, 2010. – С. 90-94.
3. Михайлов Г.А. Нарезание цилиндрических колес с внешними зубьями многозаходными фасонными червячными фрезами [Текст] / Г.А. Михайлов [и др.]. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 173с.

Стеблецов Юрий Николаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
Тел. (4862) 55-55-24
E-mail.: stblecov@mail.ru

Тарапанов Александр Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
Тел. (4862) 55-55-24
E-mail.: tarapanov@yandex.ru

Михайлов Геннадий Александрович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные инструментальные системы»
Тел. (4862) 55-55-24
E-mail.: stblecov@mail.ru

Yu.N. STEBLECOV, A.S. TARAPANOV, G.A. MIXAJLOV

EXPERIMENTAL PROBE OF FORCES OF CUTTING AT HANDLING OF TOOTH GEARS OF NOVIKOV TRANSMISSION

In a paper values of components of force of the cutting, received experimentally are reduced, at handling of tooth gears of Novikov transmission by worm hobs and a technique of their definition with use of a multiple-purpose dynamometer.

Keywords: making forces of cutting, a worm hob, Novikov gears, experimental researches.

BIBLIOGRAPHY

1. Steblecov, Yu.N. Opredelenie sil rezaniya processa narezaniya zubchaty'x kolyos peredachi Novikova chervyachny'mi frezami [Tekst] / Yu.N. Steblecov, A.S. Tarapanov // *Fundamental'ny'e i prikladny'e problemy' texniki i texnologii*. – 2010. – № 5-2. – S. 31-35.
2. Steblecov, Yu.N. Razrabotka matematicheskogo otobrazheniya sxemy' rezaniya zubchaty'x kolyos peredachi Novikova chervyachny'mi frezami [Tekst] / Yu.N. Steblecov, A.S. Tarapanov // *Materialy' nauchno-prakticheskoy konferencii molody'x uchyony'x i aspirantov «Nauchny'j potencial Orlovshhiny' v modernizacii promy'shlennogo kompleksa maly'x gorodov Rossii»*. – Орел: Орел GTU, 2010. – S. 90-94.

3. Mixajlov G.A Narezanie cilindricheskix kolyos s vneshnimi zub`yami mnogoaxodny'mi fasonny'mi chervyachny'mi frezami [Tekst] / G.A Mixajlov [i dr.]. – M.: Mashinostroenie-1, 2006. – 173s.

Steblecov Yuriy Nikolaevich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Postgraduate student of department “Machine Building Technology and Design Technology Computer Science”

Tel. (4862) 55-55-24

E-mail.: stblecov@mail.ru

Tarapanov Aleksandr Sergeevich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Doctor technical science, professor of department “Machine Building Technology and Design Technology Computer Science”

Tel. (4862) 55-55-24

E-mail.: tarapanov@yandex.ru

Mixajlov Gennadij Aleksandrovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department department “Machine Building Technology and Design Technology Computer Science”

Tel. (4862) 55-55-24

E-mail.: stblecov@mail.ru

В.Д. КУХАРЬ, С.Е. СЕЛЕДКИН, А.Е. КИРЕЕВА

КИНЕМАТИКА ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОСАДКЕ ТОНКОЛИСТОВЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

В данной статье рассмотрены основные схемы течения металла, при осадке тонких прямоугольных заготовок, протекающих в условиях значительного трения на контактных поверхностях и без него. Выявлены основные закономерности. Проведена качественная и количественная оценка процесса деформирования.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, метод конечных элементов, осадка, трение, деформация.

Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с кинематикой течения металла при осадке прямоугольной деформируемой заготовки. При осадке тонкой заготовки с квадратной или прямоугольной в плане формой в большинстве случаев принимаются две кинематические схемы течения металла.

Первая схема используется для описания идеального течения металла в случае отсутствия трения. Такую схему И.Я. Тарновский называет радиальной [3]. При радиальной схеме течения металла форма поперечного сечения сохраняется, отношение сторон прямоугольного сечения остается постоянным, и коэффициенты деформации по длине и ширине сохраняются равными в течение всего периода деформирования. На рисунках 1, 2 показаны траектории движения частиц материала при осадке до степени $R = 40\%$ в случае отсутствия трения, полученные в результате расчета по предложенной выше методике для материала медь М2 в предположении изотропии его механических свойств [2]. (Траектории движения частиц, совмещенных с узлами конечных элементов (КЭ), построены специальной программой визуализации результатов расчета). Из рисунков видно, что радиальная схема течения в случае отсутствия трения хорошо подтверждается результатами расчетов по методу конечных элементов (МКЭ).

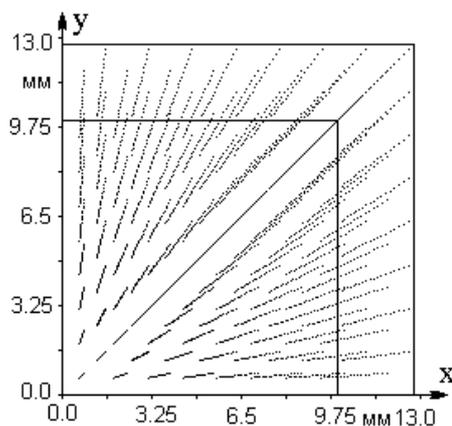


Рисунок 1 – Схема течения металла при осадке квадратной пластины ($m = 0$)

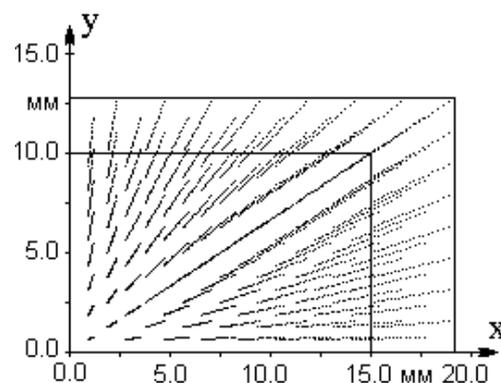


Рисунок 2 – Схема течения металла при осадке прямоугольной пластины ($m = 0$)

Однако большинство реальных технологических процессов протекает в условиях значительного трения на контактных поверхностях. Направление течения металла в этом случае качественно определяют на основании правила наименьшего сопротивления: при осадке между параллельными плитами с трением по контакту сопротивление течению какой-либо частицы в горизонтальной плоскости будет наименьшим в направлении кратчайшей нормали к периметру сечения [1].

Поэтому план образца прямоугольного или квадратного сечения можно разделить диагоналями на участки, в которых направления кратчайших нормалей к периметру параллельны и, следовательно, все частицы данного участка перемещаются в одном направлении. Такую схему течения металла принято называть нормальной. Применяется она при большом коэффициенте трения. На рисунках 3, 4 приведены траектории движения частиц при осадке образца из меди М2 до степени $R = 40\%$ в случае предельного трения ($m = 1$), полученные расчетом по МКЭ. Анализ результатов показывает, что нормальная кинематическая схема течения в случае значительного трения на контактных поверхностях весьма приблизительно отражает картину течения материала и дает неточную количественную оценку процесса деформирования.

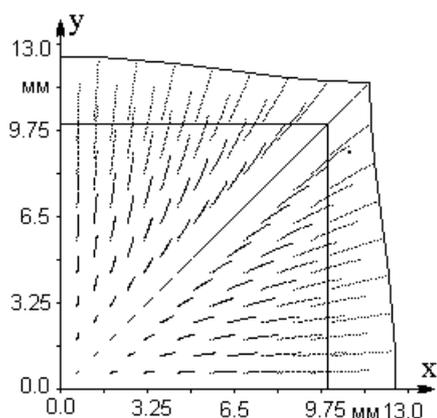


Рисунок 3 – Схема течения металла при осадке квадратной пластины ($m = 1$)

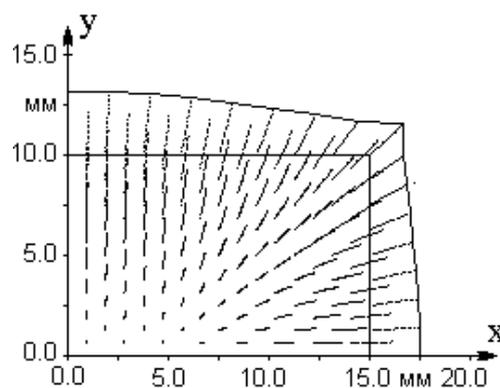


Рисунок 4 – Схема течения металла при осадке прямоугольной пластины ($m = 1$)

В целом, рядом исследователей сформулировано следующее правило наименьшего периметра: при осадке с трением поперечное сечение любой формы стремится к круговому, имеющему наименьший периметр при данной площади сечения. На рисунках 5, 6 показаны формы прямоугольной и квадратной заготовок при осадке до 80% для материала $\sigma_S = 100 \text{ МПа} = \text{const}$, полученные расчетом по МКЭ. Вычисленная форма деформированных заготовок соответствует правилу наименьшего периметра.

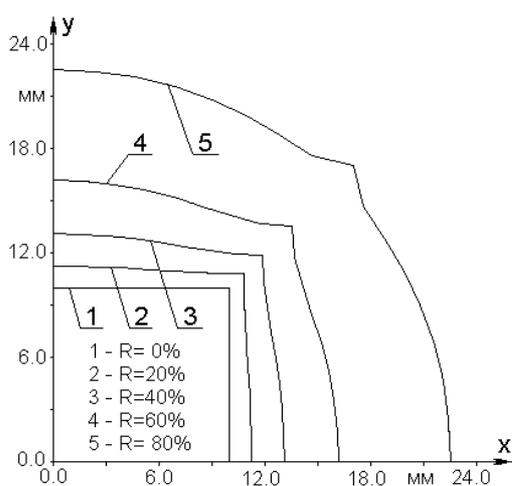


Рисунок 5 – Изменение формы квадратной в плане заготовки при осадке ($m = 1, \sigma_S = 100 \text{ МПа}$)

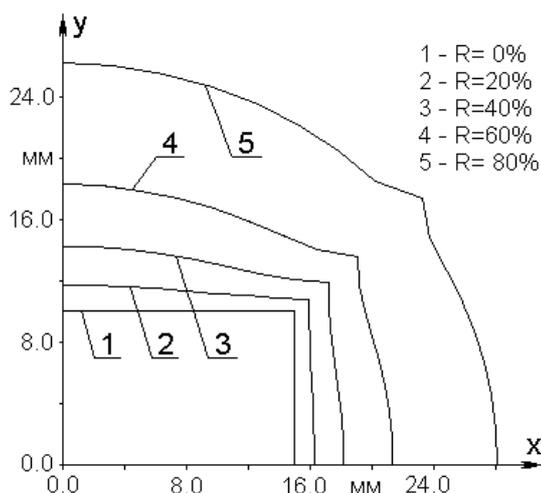


Рисунок 6 – Изменение формы прямоугольной в плане заготовки при осадке ($m = 1, \sigma_S = 100 \text{ МПа}$)

Следует отметить, что наряду с указанными, предложен ряд других идеализированных схем течения металла при среднем значении коэффициента трения [3]. Все они занимают промежуточное положение между радиальной и нормальной схемой с приближением к той или другой в зависимости от величины коэффициента трения. Расчеты по МКЭ, проведенные при различных коэффициентах трения, показывают, что течение металла носит достаточно сложный характер и сильно отличается в различных частях заготовки. В связи с этим можно утверждать, что аналитические решения позволяют описать только качественную картину деформирования. Для получения более точной количественной оценки процесса деформирования более перспективными являются численные методы и, в том числе, предложенный вариант построения решения на основе МКЭ [2].

Данная работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ № 10-08-97527-р_центр_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов [Текст]: в 3-х т. / С.И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1960. – Т. 1. – 376 с.; Т. 2. – 416 с.; Т. 3. – 306 с.
2. Кухарь, В.Д. Расчет напряженного состояния при конечно-элементном анализе процессов пластического формоизменения [Текст] / В.Д. Кухарь, Е.М. Селедкин, А.Е. Киреева // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – 2010. – Вып. 4. – С. 60-64.
3. Тарновский, И.Я. Формоизменение при пластической обработке металлов [Текст] / И.Я. Тарновский. – М.: Metallurgizdat, 1954. – 534 с.

Кухарь Владимир Денисович

Тульский государственный университет, г. Тула

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика», проректор по научной работе

Тел. (4872) 35-18-32

E-mail: vladimir.d.kuchar@tsu.tula.ru

Селедкин Сергей Евгеньевич

Тульский государственный университет, г. Тула

Кандидат технических наук

Тел. (4872) 35-18-32

E-mail: tm@tsu.tula.ru

Киреева Алена Евгеньевна

Тульский государственный университет, г. Тула

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика»

Тел. (4872) 35-18-32,

E-mail: kirealena@yandex.ru

V.D. KUXAR', S.E. SELYODKIN, A.E. KIREEVA

KINEMATICS OF METAL FLOW DURING THE SEDIMENT OF THIN SHEET RECTANGULAR PREFORMS

In given article the basic schemes of a current of metal are considered, at a deposit of the thin rectangular preparations proceeding in the conditions of a considerable friction on contact surfaces and without it. The basic laws are revealed. The qualitative and quantitative estimation of process of deformation is spent.

Keywords: *processing of metals by pressure, method of final elements, deposit, friction, deformation*

BIBLIOGRAPHY

1. Gubkin, S.I. Plasticheskaya deformaciya metallov [Tekst]: v 3-x t. / S.I. Gubkin. – M.: Metallurgizdat, 1960. – T. 1. – 376 s.; T. 2. – 416 s.; T. 3. – 306 s.
2. Kuxar`, V.D. Raschyot napryazhyonnogo sostoyaniya pri konechno-e`lementnom analize processov plasticheskogo formoizmeneniya [Tekst] / V.D. Kuxar`, E.M. Selyodkin, A.E. Kireeva // Izvestiya TulGU. Seriya Texnicheskie nauki. – 2010. – Vy'p. 4. – S. 60-64.
3. Tarnovskij, I.Ya. Formoizmenenie pri plasticheskoy obrabotke metallov [Tekst] / I.Ya. Tarnovskij. – M.: Metallurgizdat, 1954. – 534 s.

Kuxar` Vladimir Denisovich

Tula State University, Tula

Doctor of technical science, professor, head of department “Theoretical Mechanics”, pro-rector on scientific work

Tel. (4872) 35-18-32

E-mail: vladimir.d.kuchar@tsu.tula.ru

Selyodkin Sergej Evgen`evich

Tula State University, Tula

Candidate of technical science

Tel. (4872) 35-18-32

E-mail: tm@tsu.tula.ru

Kireeva Alyona Evgen`evna

Tula State University, Tula

Candidate of technical science, associate professor of department “Theoretical Mechanics”

Tel. (4872) 35-18-32

E-mail: kirealena@yandex.ru

ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 378.02:372.8: 371.64/.69: 621.01; 621.81/.85; 621.88; 62-2

Л.А. САВИН, Р.Н. ПОЛЯКОВ

ВОПРОСЫ ОСНАЩЕНИЯ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ ОБЩЕИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ

В статье представлено описание учебно-научного комплекса по общетехническим дисциплинам, разработанного и внедренного в учебном процессе кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг». Комплекс включает в себя 5 лабораторных установок, современную информационно-измерительную систему, программное и учебно-методическое обеспечение.

Ключевые слова: детали машин, лабораторная установка, информационно-измерительная система, программное обеспечение.

ВВЕДЕНИЕ

Ключевой вопрос развития любой социально-экономической системы – формирование профессионального кадрового потенциала. Безусловно, это касается и сферы инженерной деятельности, обеспечивающей выпуск высокотехнологичной конкурентоспособной продукции и являющейся фундаментом инновационного развития. Можно констатировать факт определенного недостатка высококлассных инженеров на промышленных предприятиях России. В условиях возможного и желательного инновационного подъема промышленного производства в нашей стране эта тенденция значительно усилится. Поэтому представляется весьма насущной необходимость совершенствования уровня инженерной подготовки, прежде всего, в высших учебных заведениях.

Одной из базовых составляющих обучения инженеров являются лабораторные практикумы, которые формируют целый пласт знаний и навыков по подготовке, планированию, проведению и анализу результатов эксперимента, умению использовать автоматизированные измерительно-информационные и CAD/CAE системы [1]. В большинстве российских вузов учебные лаборатории по изучению базовых технических дисциплин оснащены устаревшими экспериментальными установками или собственными разработками упрощенного типа, в которых используются в основном средства измерений параметров механического типа с последующей ручной обработкой данных. При этом каждая лабораторная работа проводится, как правило, на отдельной специальной установке, что малоэффективно с точки зрения больших массогабаритов и удельной стоимости оборудования. Все это свидетельствует о необходимости создания универсальных многофункциональных лабораторных комплексов на основе современной методологии применения информационных систем, предполагающих реализацию исследовательского подхода к проведению лабораторных и практических работ.

В результате выполнения проекта в рамках ФЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» был разработан учебно-научный комплекс по общетехническим дисциплинам, включающий в себя 5 базовых лабораторных установок с различными вариантами их модификаций [2]. Методическим дополнением комплекса служит электронный учебник, содержащий теоретический материал, учебно-методические разработки, лабораторный практикум, сборник вопросов и задач, презентации лекций, автоматизированную систему оценки и контроля знаний, справочные данные по курсовому проектированию, тезаурус технических терминов. Особенности разработанного комплекса является автоматизированная обработка экспериментальных данных и формирование отчетной документации, применение современных измерительно-информационных систем и мультимедийных средств в процессе проведении различных видов учебных занятий.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Лабораторная установка по исследованию механических передач представлена на рисунке 1. Возможности данной модели позволяют проводить измерения энергетических, силовых и кинематических параметров основных видов механических передач, применяемых в большинстве современных машинных агрегатов. Базовая идея выполняемых на этой установке экспериментальных работ заключается в исследовании влияния частоты вращения, передаточных отношений и рабочей нагрузки на коэффициент полезного действия и передаточные отношения всей системы в целом и каждого узла в отдельности, а также на коэффициенты скольжения ременной передачи. Установка позволяет проводить 6 лабораторных работ, включая исследование ременных и цепных передач, паспортизацию и КПД зубчатых и червячных передач. В настоящее время ведется работа над вводом в учебный процесс модулей, позволяющих проводить изучение исследование лобового вариатора и передачи винт-гайка.

Установка по исследованию механических соединений (рис. 2) позволяет проводить 6 лабораторных работ по изучению предельных состояний несущих элементов, включая определение усилий и коэффициентов трения в затянутом болтовом соединении, работоспособности клеммовых соединений; определение предельных нагрузок в призматических шпонках; изучение распределения напряжений в заклепочном сварном швах.

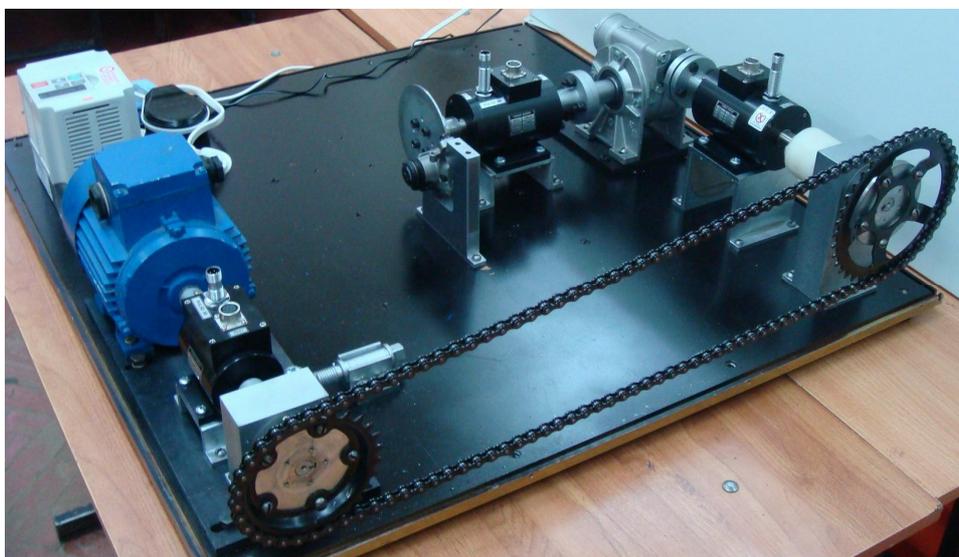


Рисунок 1 – Лабораторная установка по исследованию механических передач

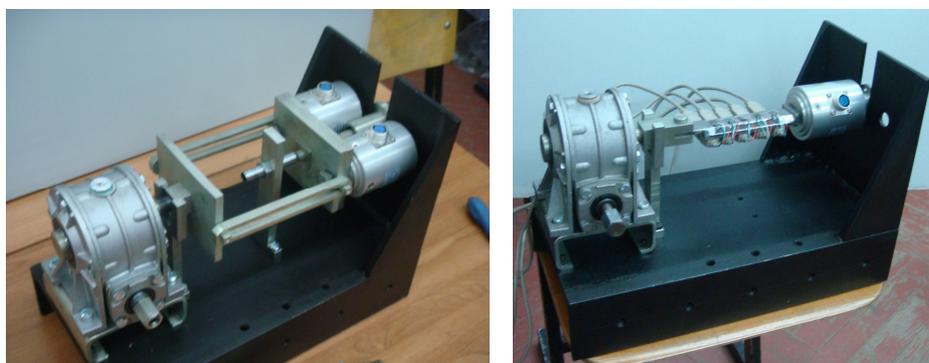


Рисунок 2 – Лабораторная установка по исследованию механических соединений

Учебно-научная лабораторная установка по исследованию роторно-опорных узлов (рис. 3) представляет собой призматическую платформу, на которой установлен асинхронный электродвигатель АИР63А2У3 ($N_{\text{НОМ}} = 0,37$ кВт, $n_{\text{НОМ}} = 2760$ об/мин) с системой авто-

матического управления; два подшипниковых модуля, в которых могут быть установлены различные виды и типоразмеры опор (подшипники качения, скольжения или комбинации с их участием); соединенный с помощью муфты с валом двигателя ротор, включающий устройство нагружения. В базовой компоновке установка позволяет проводить ряд лабораторных работ, в числе которых построение амплитудно-частотных характеристик роторов с различными подшипниками; изучение упругих деформаций и видов прецессий вращающихся валов; исследование трибологических характеристик подшипников качения и скольжения. Потенциальные возможности установки позволяют расширить при необходимости диапазон исследований на основе изучения самовозбуждающихся и параметрических колебаний роторов, жесткости и демпфирования подшипников скольжения, вибрационной диагностики роторов.



Рисунок 3 – Лабораторная установка по исследованию роторно-опорных узлов

Управление лабораторными установками по исследованию механических передач, соединений и роторно-опорных узлов ведется через единую информационно-измерительную систему (ИИС) на базе аналого-цифрового преобразователя (рис. 4), в которых в качестве первичных преобразователей используются аналоговые датчики, преобразующие измеряемую физическую величину в определенном диапазоне в пропорциональный электрический сигнал [3]. Аналоговый сигнал с датчика поступает на модуль согласования, наличие которого продиктовано необходимостью приведения сигналов с датчиков к уровню и наименованию сигнала, на котором работает плата АЦП (например, с датчика выходит токовый сигнал в диапазоне 0..20 мА, а АЦП воспринимает данные в диапазоне 0..5 В; модуль согласования пропорционально преобразует значение от 0..20 мА в диапазон 0..5 В). Модуль согласования может и не быть в составе ИИС, если сигналы совпадают; но ввиду сложности подбора датчиков в соответствии с данным условием, подобное встречается редко. Неотъемлемой частью ИИС является персональный компьютер, в состав которого входит плата аналого-цифрового (АЦП) и цифро-аналогового преобразования (ЦАП), необходимые для: соответственно, преобразования унифицированного аналогового сигнала в цифровой вид, понятный для ЭВМ и обратного процесса – преобразования цифровых данных с ЭВМ в аналоговый сигнал для управления исполнительными устройствами.

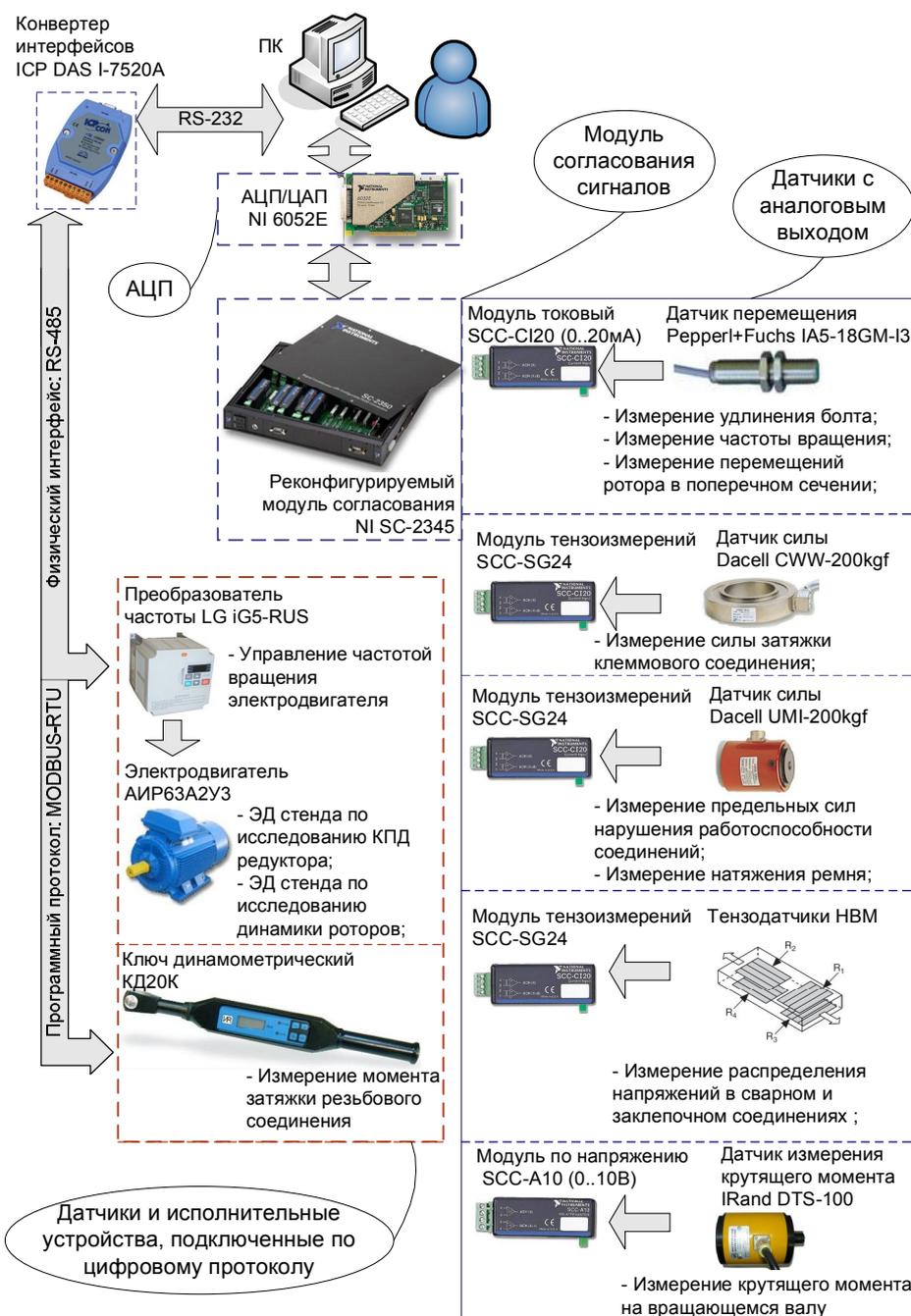


Рисунок 4 – Принципиальная схема реконфигурируемой ИИС на базе единой платы АЦП

Установка по исследованию конструкций муфт (рис. 5) является сборно-разборной моделью и предназначена для изучения особенностью реальных муфт, знакомства с методами расчета и выбора, установки и настройки муфт, освоения навыков сборки элементов механического привода, проведения экспериментальных исследований момента срабатывания, крутильной жесткости, компенсирующей способности. В состав установки входят следующие виды муфт: глухая компенсирующая (с плавающим вкладышем), упруго-компенсирующая с резиновой звездочкой, предохранительная со срезным штифтом, предохранительная дисковая фрикционная. Нагружение муфт крутящим моментом осуществляется через зубчатую передачу с одновременным его измерением с помощью динамометрического ключа. Данный объект являются примером партнерства с другими авторами и производителями учебного оборудования.

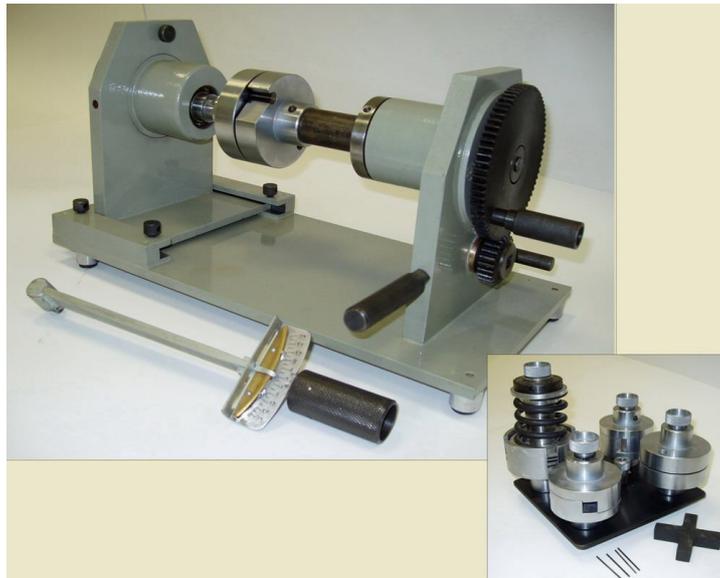


Рисунок 5 – Модельная установка по исследованию конструкций муфт

Универсальный лабораторный комплекс по общеинженерным дисциплинам позволяет обеспечить учебный процесс по дисциплинам «Детали машин и основы конструирования», «Основы проектирования машин», «Прикладная механика», «Мехатроника». Его универсальность и ориентированность на современные информационно-измерительные технологии позволяет его также использовать в рамках дисциплин «Конструирование мехатронных модулей», «Динамика машин», «Теория автоматического управления» и др. Созданный продукт показал свою конкурентоспособность на рынке учебного оборудования и на сегодняшний день внедрен в 10 крупных университетах России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савин, Л.А. Методологические аспекты общеинженерной подготовки: проблемы и предложения [Текст] / Л.А. Савин // «Основы проектирования и детали машин – XXI век»: материалы II Всероссийской научно-методической конференции. – Орел: ОрелГТУ, 2010. – С. 67-73.
2. Савин, Л.А. Лабораторный стенд для исследования динамических характеристик роторных систем [Текст] / Л.А. Савин [и др.] // «Основы проектирования и детали машин – XXI век»: материалы Всероссийской научно-методической конференции. – Орел: ОрелГТУ, 2007. – С. 196-202.
3. Савин, Л.А. Лабораторный стенд для исследования элементной базы деталей машин / Л.А. Савин [и др.] // «Основы проектирования и детали машин – XXI век»: материалы Всероссийской научно-методической конференции. – Орел: ОрелГТУ, 2007. – С. 203-211.

Савин Леонид Алексеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг»
 E-mail: savin@ostu.ru

Поляков Роман Николаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»
 E-mail: romanpolak@mail.ru

L.A. SAVIN, R.N. POLYAKOV

QUESTIONS OF EQUIPMENT OF EDUCATIONAL LABORATORIES GENERAL-ENGINEER PREPARATIONS

In article the description of an study-scientific complex on engineering is presented the disciplines, developed and introduced in educational process of chair "Mechatronics and the International Engineering". The complex includes 5 laboratory installations, modern information-measuring system, program and study-methodical maintenance.

Keywords: *details of cars, laboratory installation, information-measuring system, the software.*

BIBLIOGRAPHY

1. Savin, L.A. Metodologicheskie aspekty' obshheinzhenernoj podgotovki: problemy' i predlozheniya [Tekst] / L.A. Savin // "Osnovy' proektirovaniya i detali mashin – XXI vek": materialy' II Vserossijskoj nauchno-metodicheskoj konferencii. – Orel: OrelGTU, 2010. – S. 67-73.
2. Savin, L.A. Laboratorny'j stend dlya issledovaniya dinamicheskix xarakteristik rotorny'x sistem [Tekst] / L.A. Savin [i dr.] // "Osnovy' proektirovaniya i detali mashin – XXI vek": materialy' Vserossijskoj nauchno-metodicheskoj konferencii. – Orel: OrelGTU, 2007. – S. 196-202.
3. Savin, L.A. Laboratorny'j stend dlya issledovaniya e`lementnoj bazy' detalej mashin / L.A. Savin [i dr.] // "Osnovy' proektirovaniya i detali mashin – XXI vek": materialy' Vserossijskoj nauchno-metodicheskoj konferencii. – Orel: OrelGTU, 2007. – S. 203-211.

Savin Leonid Alekseevich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University – Education-Science-Production Complex", Orel
Doctor of technical science, professor, head of department "Mechatronics and the International Engineering"
E-mail: savin@ostu.ru

Polyakov Roman Nikolaevich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University – Education-Science-Production Complex", Orel
Candidate of technical science, associate professor of department "Mechatronics and the International Engineering"
E-mail: romanpolak@mail.ru

А.В. МОРОЗОВА

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОСТРАНСТВ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ СПЕЦИАЛИСТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

В статье анализируется опыт решения проблемы формализации информационных пространств, определенных федеральными государственными образовательными стандартами нового поколения, путем построения аксиоматического базиса квалиметрической многомерной модели социально-профессиональной компетентности специалиста.

Ключевые слова: квалиметрия кадров, математическая модель, аксиоматический базис, многоуровневая практикоориентированная система подготовки кадров, машиностроение, компетенция, компетентность.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Системной характеристикой федеральных государственных стандартов профессионального образования нового поколения является компетентностный подход к реализации задач кадрового обеспечения инновационной экономики России. В соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) и среднего профессионального образования (ФГОС СПО) нового поколения оценка качества подготовки обучающихся и выпускников осуществляется в двух основных направлениях: оценка уровня освоения дисциплин и оценивание уровня сформированности его социально-профессиональных компетенций [1, 2, 3]. Если процедура оценивания качества усвоения материала по учебной дисциплине имеет системное научное обоснование, то технология оценивания уровня сформированности социально-профессиональной компетенции специалиста в настоящее время сформирована еще фрагментарно.

В этой связи целесообразна разработка проблемы создания и реализации модели оценивания, которая реализует схему: ОЦЕНКА УСВОЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИДАКТИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ → ОЦЕНКА УСВОЕНИЯ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН → ОЦЕНКА УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИИ → ОЦЕНКА УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ СОЦИАЛЬНО-ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ СПЕЦИАЛИСТА.

Особую значимость эта проблема приобретает в связи с массовым переходом на формирование корпоративных систем менеджмента качества, в рамках которых предусматривается деятельность в рамках процессов по измерению, анализу и улучшению («Мониторинг, измерение и анализ процессов», «Управление несоответствиями» и «Улучшение процессов посредством политики, целей, а также корректирующих и предупреждающих действий»). Эта деятельность затрагивает все процессы внутривузовских систем менеджмента качества (СМК), в том числе и процессы «Проектирование и разработка образовательных программ» и «Реализация основных образовательных программ» [4, 5, 6, 7].

АКТУАЛЬНОСТЬ И НОВИЗНА

В основе разработки образовательных программ направлений и специальностей, формируемых на основе новых ФГОС ВПО и ФГОС СПО, лежит следующая логическая цепочка: множество дидактических единиц методом простой группировки формирует элементы множества учебных дисциплин, которое методом суперпозиционного синергетического взаимодействия определяет множество социально-профессиональных компетенций молодых специалистов.

Проблемным остается переход от оценивания знаний, умений и навыков студентов к оцениванию уровня сформированности их социально-профессиональной компетентности. По нашему мнению, основу такой технологии должны составлять теоретические разработки,

используемые для квалиметрического оценивания объектов любой природы (квалиметрическая модель оценка качества наукоемкой продукции, квалиметрическая модель оценки результативности деятельности образовательного учреждения, квалиметрическая модель оценки качества жизни и др.) [8, 9, 10, 11], основы современной тестологии [12, 13], а также модель состояния подготовленности специалиста в компетентностном формате [14, 15].

Основу квалиметрической многомерной модели социально-профессиональной компетентности специалиста составляет следующий аксиоматический базис, обеспечивающий целостность многомерного анализа данных.

1. Существует некоторое n -мерное ($n \rightarrow \infty$) информационное пространство N , определяющее содержание дидактических единиц ФГОС, m -мерное ($m \rightarrow \infty$) информационное пространство M , определяющее множество учебных дисциплин ФГОС, и l -мерное ($l \rightarrow \infty$) информационное пространство L , определяющее множество социально-профессиональных компетенций молодого специалиста в соответствии с ФГОС.

2. m -мерное ($m \rightarrow \infty$) информационное пространство M и l -мерное ($l \rightarrow \infty$) информационное пространство L являются подмножествами n -мерного ($n \rightarrow \infty$) информационного пространства N .

3. Существуют множества D , A и B , элементами которых являются соответственно дидактические единицы D_i , $i = \overline{1:n}$, учебные дисциплины A_j , $j = \overline{1:m}$ и компетенции специалиста B_k , $k = \overline{1:l}$.

4. Каждая i -я, $i = \overline{1:n}$ ось $O_N N_i$ (луч $[O_N N_i)$) пространства N отображает уровни освоения дидактической единицы D_i , $i = \overline{1:n}$. На луче $[O_N N_i)$ определен единичный вектор $\overline{e_{Ni}}$ с началом в точке O_N . Если точка $D_{pi} \in [O_N N_i)$, то вектор $\overline{O_N D_{pi}} = q_{pi} \cdot \overline{e_{Ni}}$, где q_{pi} – координата вектора $\overline{O_N D_{pi}}$ на оси $O_N N_i$, интерпретируемая как уровень усвоения дидактической единицы D_i , $i = \overline{1:n}$.

5. Каждая j -я, $j = \overline{1:m}$ ось $O_M N_j$ (луч $[O_M N_j)$) пространства M отображает уровни освоения учебной дисциплины A_j , $j = \overline{1:m}$. На луче $[O_M N_j)$ определен единичный вектор $\overline{e_{Mj}}$ с началом в точке O_M . Если точка $A_{pj} \in [O_M N_j)$, то вектор $\overline{O_M A_{pj}} = s_{pj} \cdot \overline{e_{Mj}}$, где s_{pj} – координата вектора $\overline{O_M A_{pj}}$ на оси $O_M N_j$, интерпретируемая как уровень освоения учебной дисциплины A_j , $j = \overline{1:m}$.

6. Каждая k -я, $k = \overline{1:l}$ ось $O_L N_k$ (луч $[O_L N_k)$) пространства L отображает уровни сформированности компетенции специалиста B_k , $k = \overline{1:l}$. На луче $[O_L N_k)$ определен единичный вектор $\overline{e_{Lk}}$ с началом в точке O_L . Если точка $B_{pk} \in [O_L N_k)$, то вектор $\overline{O_L B_{pk}} = h_{pk} \cdot \overline{e_{Lk}}$, где h_{pk} – координата вектора $\overline{O_L B_{pk}}$ на оси $O_L N_k$, интерпретируемая как уровень сформированности компетенции B_k , $k = \overline{1:l}$.

7. Каждая i -я, $i = \overline{1:n}$ ось $O_N N_i$ имеет количественную неотрицательную шкалу значений, т.е. каждая точка q_i на i -й оси соответствует конкретному количеству знаний по дидактической единице D_i . В частности, значение $q_{pr} = 0$ означает, что у p -го объекта отсутствуют знания по дидактической единице D_r , $r = \overline{1:n}$, а значение $q_{pr} \neq 0$ означает, что p -й объект обладает знаниями по дидактической единице D_r .

Множество знаний, полученных в результате освоения дидактических единиц p -м объектом, отображается в n -мерном пространстве N точкой $N_p(q_{p1}; q_{p2}; \dots; q_{pr}; \dots; q_{pn})$, где q_{pr} – проекция точки N_p на ось $O_N N_r$, $r = \overline{1:n}$.

Совокупное количество знаний X_p , содержащихся в дидактических единицах, которыми обладает p -й объект, функционально зависит от значений всех координат точки N_i , $i = \overline{1:n}$ информационного пространства N :

$$X_p = F_1(q_{p1}; q_{p2}; \dots; q_{pr}; \dots; q_{pn}). \quad (1)$$

В случае, когда в p -го объекта отсутствуют знания по дидактической единице D_r , $r = \overline{1:n}$, выражение (1) примет вид:

$$X_p = F_1(q_{p1}; q_{p2}; \dots; q_{pr-1}; 0; q_{pr+1}; \dots; q_{pn}). \quad (2)$$

Каждая j -я, $j = \overline{1:m}$ ось $O_M N_j$ имеет количественную неотрицательную шкалу значений, т.е. каждая точка s_j на j -й оси соответствует конкретному количеству знаний по учебной дисциплине A_j . В частности, значение $s_{pw} = 0$ означает, что у p -го объекта отсутствуют знания по дидактической единице A_w , $w = \overline{1:m}$, а значение $s_{pw} \neq 0$ означает, что p -й объект обладает знаниями по учебной дисциплине A_w .

Множество знаний, полученных в результате освоения учебных дисциплин p -м объектом, отображается в m -мерном пространстве M точкой $M_p(s_{p1}; s_{p2}; \dots; s_{pw}; \dots; s_{pm})$, где s_{pw} – проекция точки M_p на ось $O_M M_w$, $w = \overline{1:m}$.

Совокупное количество знаний Y_p , содержащихся в учебных дисциплинах, которыми обладает p -й объект, функционально зависит от значений всех координат точки M_j , $j = \overline{1:m}$ информационного пространства M :

$$Y_p = F_2(s_{p1}; s_{p2}; \dots; s_{pw}; \dots; s_{pm}). \quad (3)$$

В случае, когда в p -го объекта отсутствуют знания по учебной дисциплине A_w , $w = \overline{1:m}$, выражение (3) примет вид:

$$Y_p = F_2(s_{p1}; s_{p2}; \dots; s_{pw-1}; 0; s_{pw+1}; \dots; s_{pm}). \quad (4)$$

Каждая k -я, $k = \overline{1:l}$ ось $O_L L_k$ имеет количественную неотрицательную шкалу значений, т.е. каждая точка h_k на k -й оси соответствует конкретному уровню сформированности компетенции B_k . В частности, значение $h_{pv} = 0$ означает, что p -й объект не обладает компетенцией B_v , $v = \overline{1:l}$, а значение $h_{pv} \neq 0$ означает, что p -й объект обладает компетенцией B_v .

Множество компетенций, которыми обладает p -й объект, отображается в l -мерном пространстве L точкой $L_p(h_{p1}; h_{p2}; \dots; h_{pv}; \dots; h_{pl})$, где h_{pv} – проекция точки $O_L L_v$ на ось $O_M M_v$, $v = \overline{1:l}$.

Уровень профессиональной компетентности Z_p , которыми обладает p -й объект, функционально зависит от значений всех координат точки L_k , $k = \overline{1:l}$ информационного пространства L :

$$Z_p = F_3(h_{p1}; h_{p2}; \dots; h_{pv}; \dots; h_{pl}). \quad (5)$$

В случае, когда в p -го объекта отсутствует компетенция B_k , $k = \overline{1:l}$, выражение (5) примет вид:

$$Z_p = F_3(h_{p1}; h_{p2}; \dots; h_{pk-1}; 0; h_{pk+1}; \dots; h_{pl}). \quad (6)$$

Количество знаний S_j по учебной дисциплине A_j , $j = \overline{1:m}$ функционально зависит от значений всех координат q_i , $i = \overline{1:n}$ точки N_i информационного пространства N :

$$S_j = f(q_1; q_2; \dots; q_i; \dots; q_n). \quad (7)$$

В случае, когда дидактическая единица D_r , $r = \overline{1:n}$ не входит в содержание учебной дисциплины A_j , $j = \overline{1:m}$ выражение (7) примет вид:

$$S_j = f(q_1; q_2; \dots; q_{r-1}; 0; q_{r+1}; \dots; q_n). \quad (8)$$

Уровень сформированности H_k компетенции B_k , $k = \overline{1:l}$ функционально зависит от значений всех координат q_i , $i = \overline{1:n}$ точки N_i информационного пространства N :

$$H_k = g(q_1; q_2; \dots; q_i; \dots; q_n). \quad (9)$$

В случае, когда дидактическая единица D_r , $r = \overline{1:n}$ не влияет на уровень сформированности компетенции B_k , $k = \overline{1:l}$ выражение (9) примет вид:

$$H_k = g(q_1; q_2; \dots; q_{r-1}; 0; q_{r+1}; \dots; q_n). \quad (10)$$

Количество знаний по всей совокупности учебных дисциплин, определенной ФГОС, Y_p , которым обладает p -й объект, функционально детерминирован значениями количества знаний S_j по каждой из изучаемых учебных дисциплин A_j , $j = \overline{1:m}$:

$$Y_p = \Psi(S_1; S_2; \dots; S_j; \dots; S_m). \quad (11)$$

Уровень сформированности профессиональной компетенции Z_p , которым обладает p -й объект, функционально детерминирован совокупностью уровней сформированности H_k каждой из совокупности компетенций B_k , определенных ФГОС, $k = \overline{1:l}$:

$$Z_p = G(H_1; H_2; \dots; H_j; \dots; H_l). \quad (12)$$

Отсюда: существует функциональная зависимость между уровнем сформированности профессиональной компетентности Z_p , которым обладает p -й объект, и количеством его знаний по всей совокупности учебных дисциплин Y_p в виде:

$$Z_p = \Phi(Y_p). \quad (13)$$

ВЫВОД

Предложенный вариант формализации информационных полей, определенных ФГОС нового поколения, и сформулированный на ее основе аксиоматический базис позволяет в дальнейшем разработать:

- модель оценки уровня сформированности компетенций специалиста;
- технологию оценивания уровня сформированности социально-профессиональной компетентности специалиста;
- алгоритм и механизм управления качеством сформированности компетенций специалиста на стадиях жизненного цикла его подготовки в условиях многоуровневой практикоориентированной системы подготовки кадров для машиностроения на базе профильного вуза университетского комплекса [16];
- модель многокритериальной оптимизации выбора приоритетной области деятельности молодого специалиста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозова, А.В. Математические основы квалиметрического моделирования конкурентоспособности инженерно-технических кадров [Текст] / А.В. Морозова // Известия ОрелГТУ. Серия Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 3-2 / 275(561). – С. 140-150.
2. Морозова, А.В. Применение квалиметрических методов в оценке специалиста технического профиля [Текст] / А.В. Морозова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 5 (283). – С. 105-110.
3. Морозова, А.В. Подготовка рабочих кадров в условиях профессионального колледжа профильного вуза [Текст] / А.В. Морозова // Среднее профессиональное образование. – 2011. – № 7. – С. 20-21.
4. Антропов, В.А. Система управления качеством подготовки специалистов в отраслевом высшем учебном заведении [Текст] / В.А. Антропов, Н.Н. Киселева, В.Л. Нестеров. – М.: ВИНТИ РАН, 2007. – 236 с.
5. Горленко, О.А. Создание систем менеджмента качества в организации [Текст]: монография / О.А. Горленко, В.В. Мирошников. – М.: Машиностроение-1, 2002. – 126 с.
6. Менеджмент качества в образовательных учреждениях [Текст]: в 2-х ч. / Д.В. Пузанков [и др.]. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. – Ч. 1. – 116 с.; Ч. 2. – 428 с.
7. Шлыков, Г.П. Система менеджмента качества университета. Руководство по качеству и избранные документированные процедуры [Текст] / Г.П. Шлыков. – М.: НТК «Трек», 2008. – 300 с.
8. Азгальдов, Г.Г. Квалиметрия жизни [Текст] / Г.Г. Азгальдов [и др.]. – Ижевск: Издательство Института экономики и управления УдГУ, 2006. – 820 с.
9. Бондарь, А.В. Разработка интегрированной системы управления качеством наукоемких изделий [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.23 / Бондарь Александр Викторович. – Воронеж, 2008. – 358 с.
10. Васильев, В.И. Оценка качества деятельности образовательного учреждения [Текст] / В.И. Васильев [и др.]. – М.: Издательство ИКАР, 2005. – 320 с.
11. Васильев, В.И. Статистический анализ многомерных объектов произвольной природы [Текст] / В.И. Васильев [и др.]. – М.: Издательство ИКАР, 2004. – 382 с.
12. Морозова, А.В. Методологические основы тестовой квалиметрии профессиональных кадров в машиностроении [Текст]: монография / А.В. Морозова; под ред. д.т.н., проф. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 280 с.
13. Рудинский, И.Д. Основы формально-структурного моделирования систем обучения и автоматизации педагогического тестирования знаний [Текст] / И.Д. Рудинский. – М: Горячая линия - Телеком, 2004. – 204 с.
14. Нуриев, Н. Двухуровневая образовательная система: благо или вред? [Текст] / Н. Нуриев, Л. Журбенко, С. Старыгина // Высшее образование в России. – 2008. – № 2. – С. 84-91.
15. Нуриев, Н.К. Мониторинг качества подготовки будущего инженера (бакалавра, магистра в компетентностном формате) [Текст]: учебное пособие / Н.К. Нуриев, Л.Н. Журбенко, С.Д. Старыгина. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2007. – 80 с.
16. Многоуровневая практикоориентированная система подготовки кадров для машиностроения: история, современность, перспективы: коллективная монография [Текст] / А.В. Киричек, [и др.]; под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 368 с.

Морозова Анна Валентиновна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел

Кандидат социологических наук, заместитель директора по НИР Технологического института им. Н.Н. Поликарпова

Тел.: (4862) 55-55-24

E-mail: niotiostu@gmail.com

A. V. MOROZOVA

**FORMALIZATION OF INFORMATION SPACES
OF QUALIMETRY MODEL FOR ESTIMATING OF LEVEL
OF EXPERTS THE SPECIALISTS OF THE MACHINE-BUILDING**

In article experience of the decision of a problem of formalization of the information spaces determined by federal state educational standards of new generation is analyzed, by construction of axiomatic basis qualimetry model of social - professional competence of the expert.

Keywords: квалиметрия the staff, mathematical model, axiomatic basis, multilevel практико-ориентированная system of a professional training, mechanical engineering, the competence, competence.

BIBLIOGRAPHY

1. Morozova, A.V. Matematicheskie osnovy' kvalimetricheskogo modelirovaniya konkurentosposobnosti inzhenerno-texnicheskix kadrov [Tekst] / A.V. Morozova // Izvestiya OrelGTU. Seriya Fundamental'ny'e i prikladny'e problemy' tekhniki i texnologii. – 2009. – № 3-2 / 275(561). – S. 140-150.
2. Morozova, A.V. Primenenie kvalimetricheskix metodov v ocenke specialista texnicheskogo profilya [Tekst] / A.V. Morozova // Fundamental'ny'e i prikladny'e problemy' tekhniki i texnologii. – 2010. – № 5 (283). – S. 105-110.
3. Morozova, A.V. Podgotovka rabochix kadrov v usloviyax professional'nogo kolledzha profil'nogo vuza [Tekst] / A.V. Morozova // Srednee professional'noe obrazovanie. – 2011. – № 7. – S. 20-21.
4. Antropov, V.A. Sistema upravleniya kachestvom podgotovki specialistov v otraslevom vy'sshem uchebnom zavedenii [Tekst] / V.A. Antropov, N.N. Kiseleva, V.L. Nesterov. – M.: VINITI RAN, 2007. – 236 s.
5. Gorlenko, O.A. Sozdanie sistem menedzhmenta kachestva v organizacii [Tekst]: monografiya / O.A. Gorlenko, V.V. Miroshnikov. – M.: Mashinostroenie-1, 2002. – 126 s.
6. Menedzhment kachestva v obrazovatel'ny'x uchrezhdeniyax [Tekst]: v 2-x ch. / D.V. Puzankov [i dr.]. – SPb.: Izd-vo SPbGE`TU "LE`TI", 2006. – Ch. 1. – 116 s.; Ch. 2. – 428 s.
7. Shly'kov, G.P. Sistema menedzhmenta kachestva universiteta. Rukovodstvo po kachestvu i izbranny'e dokumentirovanny'e procedury' [Tekst] / G.P. Shly'kov. – M.: NTK "Trek", 2008. – 300 s.
8. Azgal'dov, G.G. Kvalimetriya zhizni [Tekst] / G.G. Azgal'dov [i dr.]. – Izhevsk: Izdatel'stvo Instituta e`konomiki i upravleniya UdGU, 2006. – 820 s.
9. Bondar', A.V. Razrabotka integrirovannoj sistemy' upravleniya kachestvom naukoymkix izdelij [Tekst]: dis. ... dokt. texn. nauk: 05.02.23 / Bondar' Aleksandr Viktorovich. – Voronezh, 2008. – 358 s.
10. Vasil'ev, V.I. Ocenka kachestva deyatel'nosti obrazovatel'nogo uchrezhdeniya [Tekst] / V.I. Vasil'ev [i dr.]. – M.: Izdatel'stvo IKAR, 2005. – 320 s.
11. Vasil'ev, V.I. Statisticheskij analiz mnogomernyx ob`ektov proizvod'noj prirody' [Tekst] / V.I. Vasil'ev [i dr.]. – M.: Izdatel'stvo IKAR, 2004. – 382 s.
12. Morozova, A.V. Metodologicheskie osnovy' testovoj kvalimetrii professional'ny'x kadrov v mashinostroyenii [Tekst]: monografiya / A.V. Morozova; pod red. d.t.n., prof. A.V. Kiricheka. – M.: Izdatel'skij dom "Spektr", 2010. – 280 s.
13. Rudinskij, I.D. Osnovy' formal'no-strukturnogo modelirovaniya sistem obucheniya i avtomatizacii pedagogicheskogo testirovaniya znaniy [Tekst] / I.D. Rudinskij. – M: Goryachaya liniya - Telekom, 2004. – 204 s.
14. Nuriev, N. Dvuxurovnevaya obrazovatel'naya sistema: blago ili vred? [Tekst] / N. Nuriev, L. Zhurbenko, S. Sarygina // Vy'sshee obrazovanie v Rossii. – 2008. – № 2. – S. 84-91.
15. Nuriev, N.K. Monitoring kachestva podgotovki budushhego inzhenera (bakalavra, magistra v kompetentnostnom formate) [Tekst]: uchebnoe posobie / N.K. Nuriev, L.N. Zhurbenko, S.D. Sarygina. – Kazan': Izd-vo Kazan. gos. texnol. un-ta, 2007. – 80 s.
16. Mnogourovnevaya praktikoorientirovannaya sistema podgotovki kadrov dlya mashinostroyeniya: istoriya, sovremennost', perspektivy': kollektivnaya monografiya [Tekst] / A.V. Kirichek, [i dr.]; pod red. A.V. Kiricheka. – M.: Izdatel'skij dom "Spektr", 2010. – 368 s.

Morozova Anna Valentinovna

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University – Education-Science-Production Complex", Orel

Candidate of sociological science, deputy director for scientific-research work of Technological Institute named after N.N. Polikarpov

Tel.: (4862) 55-55-24

E-mail: niotlostu@gmail.com

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.3

Б.Р. ИВАНОВ, Ю.Б. ИВАНОВ

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКОВ АВТОНОМНЫХ ЦИФРОВЫХ ДОЗИМЕТРОВ

Для повышения чувствительности цифровых дозиметров с автономным напряжением питания, применяемых для контроля параметров окружающей среды, предлагается в схемах датчиков радиационного излучения использовать усилители с положительной обратной связью и компенсировать влияние напряжения начального смещения и входных токов усилителей автоматической коррекцией аддитивной погрешности.

Ключевые слова: цифровой дозиметр, коррекция погрешностей, автоматизация измерений.

При мониторинге параметров окружающей среды и контроле состава различных материалов и веществ широко применяют методы радиационного контроля. Эти методы основаны на законе ослабления рентгеновского или γ -излучения, проходящего через оптически непрозрачные контролируемые объекты. Применение метода просвечивания позволяет реализовать контроль плотности и толщины исследуемых образцов, их минералогического и химического состава, а также дефектов и структурных особенностей. Свойства веществ и изотопов определяют по значению интенсивности, измеряемой радиометрической аппаратурой.

В современных приборах радиометрического контроля для детектирования излучения применяют ионизационные камеры, газоразрядные счетчики и полупроводниковые датчики на основе фотодиодов, приемную поверхность которых закрывают алюминиевой крышкой. При такой конструкции фотодатчика его чувствительность к излучению значительно уменьшается, поэтому диапазон фототока ограничивается единицами наноампер. Вследствие этого для получения на выходе фотодатчика напряжений вольтового уровня к фотодиоду подключают усилитель с большим сопротивлением R_{OC} в цепи обратной связи, служащим для преобразования фототока I_{Φ} в выходное напряжение $U_{\text{вых}} = I_{\Phi}R_{OC}$, которое кодируется аналого-цифровым преобразователем для получения результатов измерений в цифровой форме. Чувствительность такого фотодатчика ограничивается нестабильностью входных токов и напряжения начального смещения операционного усилителя, шумовым напряжением применяемого высокоомного резистора и влиянием температуры на темновой ток фотодиода [1].

Современные микромощные операционные усилители имеют относительно малые входные токи (от 1 до 10 нА). Еще меньше входной ток у зарубежных усилителей на МОП транзисторах, работающих при однополярном напряжении питания (от 3 до 5 В), что упрощает их применение в автономных измерительных приборах. В схеме фотодатчика (рис. 1, а) для повышения чувствительности необходимо, во-первых, увеличивать сопротивление и температурную стабильность резистора R_{OC} в цепи обратной связи усилителя DA и, во-вторых, применять методы автоматической коррекции погрешностей для ослабления влияния нестабильности напряжения смещения и изменения входных токов усилителя на результаты преобразования излучения в электрический сигнал.

Включение фотодиода VD между входами усилителя DA позволяет улучшить линейность характеристики фотодатчика при одновременном уменьшении темнового тока, так как при малом напряжении разбаланса между входами усилителя фотодиод VD работает в фотогальваническом режиме (рис. 1, а). При этом входное сопротивление усилителя понижается

до уровня $R_{ВХ} \approx R_{ОС} / K_U$, и при типовом коэффициенте усиления $K_U \geq 10^5$ падение напряжения на фотодиоде не превышает значения $U_{VD} \leq 0,1$ мВ.

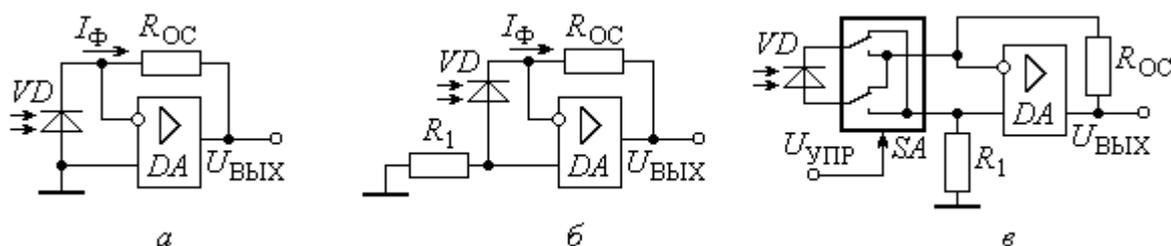


Рисунок 1 – Типовая (а) и улучшенные схемы датчиков излучения (б, в)

Усилитель DA в схеме фотодатчика охвачен 100 %-ной отрицательной обратной связью, поэтому его напряжение начального смещения $U_{СМ} \leq \pm 5$ мВ не усиливается. Однако наличие сопротивления $R_{ОС}$, через которое протекает входной ток $I_{ВХ}$ усилителя, приводит к изменению его выходного напряжения на величину $\Delta U_{ВЫХ} \approx I_{ВХ} R_{ОС}$, нестабильность которого зависит от изменения входного тока $\Delta I_{ВХ}$ усилителя в диапазоне рабочей температуры.

В фотодатчиках слабого излучения нужно выполнять преобразование малого фототока $I_{Ф} \approx (0,1 \dots 1)$ мкА в напряжение $U_{ВЫХ} \approx (1 \dots 5)$ В, т.е. устанавливать большое сопротивление $R_{ОС} \approx (1 \dots 50)$ МОм в цепи обратной связи усилителя. Однако при этом повышается шумовое напряжение от протекания входного тока $I_{ВХ}$ усилителя через резистор $R_{ОС}$.

Двукратное повышение чувствительности фотодатчика обеспечивается при подключении к неинвертирующему входу усилителя второго резистора $R_1 \approx R_{ОС}$ (рис. 1, б) [2].

При выходном напряжении этой схемы фотодатчика $U_{ВЫХ} = I_{Ф}(R_1 + R_{ОС}) \approx 2I_{Ф}R_{ОС}$ обеспечивается двукратное повышение чувствительности к измеряемому излучению. Кроме того, входные токи усилителя протекают через два одинаковых резистора, поэтому напряжение смещения усилителя $\Delta U_{СМ} \approx \Delta I_{ВХ} R_{ОС}$ зависит только от разности его входных токов, которая сравнительно мала: $\Delta I_{ВХ} \leq 0,2I_{ВХ}$. Этим достигается существенное уменьшение напряжения начального смещения $\Delta U_{СМ}$. Например, при входном токе $I_{ВХ} \approx 10$ нА усилителя КР140УД12 применение резистора $R_{ОС} = 5$ МОм в первой схеме (рис. 1, а) приводит к изменению выходного напряжения на $\Delta U_{СМ} \approx 50$ мВ, а во второй схеме (рис. 1, б) при резисторах $R_1 = R_{ОС} = 5$ МОм напряжение смещения изменяется всего на $\Delta U_{СМ} \leq 10$ мВ.

Влияние входных токов и напряжения смещения усилителя на точность фотодатчика можно скомпенсировать применением двухтактного цикла преобразования с переключением полярности фотодиода в соседних тактах аналоговым коммутатором SA (рис. 1, в).

При работе этой схемы фотодатчика в первом такте коммутатор подключает инвертирующий вход усилителя к аноду фотодиода VD , а во втором такте – к катоду фотодиода с последующим вычислением разности результатов преобразования в двух тактах. Такое сравнительно простое техническое решение позволяет практически полностью скомпенсировать влияние начального напряжения смещения и входных токов операционного усилителя на результат преобразования контролируемого излучения. При этом формирование управляющего напряжения $U_{УПР}$ и вычисление разности кодов, получаемых от аналого-цифрового преобразователя, можно реализовать соответствующим программированием обычного микропроцессора, применяемого для вывода информации на цифровой индикатор прибора.

При экспериментальных исследованиях разных схем фотодатчиков излучения установлено, что серийнопригодность таких устройств обеспечивается при использовании резисторов

сторов $R_{OC} \leq 2 \text{ МОм}$, так как их дальнейшее увеличение приводит к возрастанию влияния помех сетевой частоты 50 Гц и повышению напряжения шума на выходе усилителя. При таком ограничении в высокочувствительных фотодатчиках целесообразно использовать усилители с комбинированными цепями отрицательной и положительной обратной связи. Практически повышение чувствительности реализуется либо включением резистора $R_2 \ll R_{OC}$ в цепь положительной обратной связи усилителя (рис. 2, а), либо применением дополнительных резисторов R_2, R_3 в цепи отрицательной обратной связи усилителя (рис. 2, б) [3].

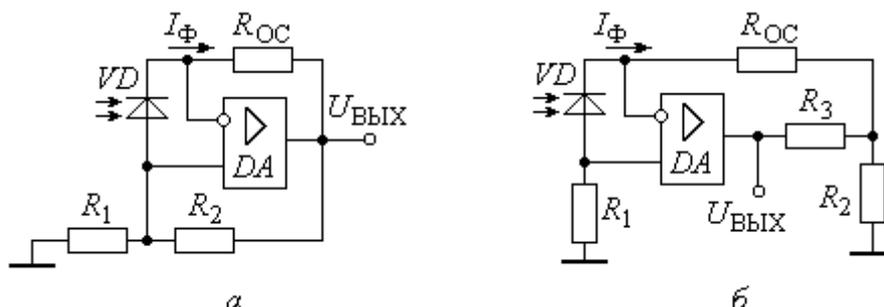


Рисунок 2 – Схемы высокочувствительных фотодатчиков с комбинированной обратной связью

В первой схеме фотодатчика с резистором $R_2 \ll R_{OC}$ в цепи положительной обратной связи усилителя DA (рис. 2, а) выходное напряжение устройства при выполнении условия $R_2 \ll R_1 = R_{OC}$ можно вычислить по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}} \approx 2I_{\Phi}R_{OC}(1 + R_{OC}/2R_2).$$

Следовательно, включение дополнительного резистора $R_2 \ll R_{OC}$ в цепь положительной обратной связи усилителя позволяет значительно – в $R_{OC}/2R_2$ раз – повысить чувствительность фотодатчика излучения по сравнению с известной схемой (рис. 1, б).

При экспериментальных исследованиях первой схемы (рис. 2, а) с сопротивлениями $R_1 = R_{OC} = 100 \text{ кОм}$ и $R_2 = 1 \text{ кОм}$ установлено, что применение цепи положительной обратной связи позволяет в 51 раз повысить чувствительность фотодатчика, и при токе фотодиода $I_{\Phi} \approx 100 \text{ нА}$ получить выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = 1,02 \text{ В}$.

Чувствительность фотодатчика можно повысить еще в два раза при охвате операционного усилителя цепью комбинированной отрицательной обратной связи (рис. 2, б), выходное напряжение которой при выполнении двух простых условий $R_2 \ll R_3, R_1 = R_{OC} = R_3$ определяется выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}} \approx 2I_{\Phi}R_{OC}(1,5 + R_{OC}/R_2).$$

При экспериментальных исследованиях схемы (рис. 2, б) с аналогичными резисторами $R_1 = R_{OC} = R_3 = 100 \text{ кОм}$, $R_2 = 1 \text{ кОм}$ в цепи обратной связи и на входе усилителя установлено, что при токе фотодиода $I_{\Phi} \approx 100 \text{ нА}$ выходное напряжение устройства составляет $U_{\text{ВЫХ}} \approx 2,03 \text{ В}$, т.е. вдвое больше, чем $U_{\text{ВЫХ}}$ предыдущего фотодатчика (рис. 2, а).

В результате проведенных исследований разработаны схемы многопредельных фотодатчиков излучения на усилителе DA с различными цепями обратной связи (рис. 3, а, б).

В этих фотодатчиках первый аналоговый ключ $SA1$ применен для коррекции аддитивной составляющей погрешности, т.е. при его размыкании фотодиод VD отключается от входа усилителя, на выходе которого формируется напряжение коррекции, зависящее от разности входных токов и напряжения смещения усилителя:

$$U_{\text{ВЫХ.КОР}} \approx (2R_{OC}\Delta I_{\text{ВХ}} + U_{\text{СМ}})K_U.$$

Это напряжение кодируется аналого-цифровым преобразователем в первом такте преобразования, а полученный код $N_{кор}$ запоминается в блоке памяти микропроцессора. В такте измерения замыкается ключ $SA1$ и выполняется кодирование исследуемого излучения, из которого вычитается код коррекции, а полученная разность выводится на индикатор прибора.

В первой схеме фотодатчика (рис. 3, а) переключение пределов измерения выполняется аналоговыми ключами $SA2$ и $SA3$. На старшем пределе измерения ключ $SA1$ замкнут, а ключи $SA2$, $SA3$ разомкнуты, поэтому фототок I_{Φ} от фотодиода VD протекает через резисторы R_{OC} , R_1 , R_2 , а выходное напряжение определяется следующим выражением:

$$U_{\text{ВЫХ3}} = I_{\Phi}(R_1 + R_2 + R_{OC}).$$

На среднем пределе измерения замыкается ключ $SA3$ в цепи положительной обратной связи усилителя DA , выходное напряжение которого в этом случае определяется выражением:

$$U_{\text{ВЫХ2}} = I_{\Phi} [R_{OC} + R_1 + (R_2 \parallel R_5) + (R_{OC} + R_1) \cdot (R_2 \parallel R_5) / (R_3 + R_4)]$$

На младшем пределе измерения размыкается ключ $SA3$ и замыкается ключ $SA2$, и выходное напряжение усилителя DA в схеме фотодатчика (рис. 3, а) можно определить по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ1}} = I_{\Phi} \{R_{OC} + R_1 + R_2 \parallel [(R_4 + R_5) + (R_{OC} + R_1) \cdot [R_2 \parallel (R_4 + R_5)] / R_3]\}.$$

Поэтому при токе фотодиода $I_{\Phi} = 10$ нА выходное напряжение на младшем пределе составляет $U_{\text{ВЫХ1}} \approx 0,6$ В.

Для повышения чувствительности фотодатчика излучения лучше использовать усилитель DA с комбинированной отрицательной обратной связью (рис. 3, б), выходное напряжение которого на старшем пределе измерения определяется формулой:

$$U_{\text{ВЫХ1}} \approx 4I_{\Phi}R_{OC}.$$

На среднем пределе выходное напряжение усилителя DA при значениях резисторов, указанных на рисунке 3, б, определяется следующим выражением:

$$U_{\text{ВЫХ2}} \approx 40I_{\Phi}R_1,$$

и на младшем пределе преобразования выходное напряжение усилителя определяется формулой:

$$U_{\text{ВЫХ3}} \approx 400I_{\Phi}R_1,$$

т.е. при фототоке $I_{\Phi} = 10$ нА выходное напряжение усилителя составляет $U_{\text{ВЫХ3}} \approx 8$ В.

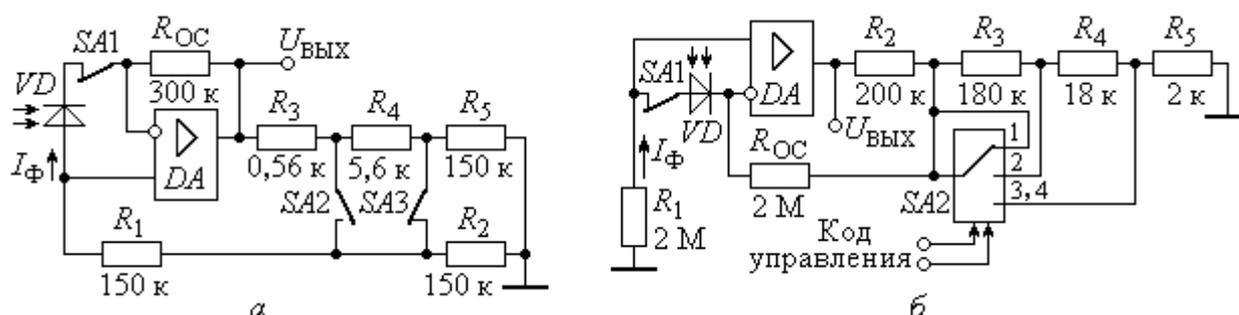


Рисунок 3 – Схемы многопредельных высокочувствительных фотодатчиков излучения

Схема фотодатчика (рис. 3, б) на микромощном усилителе с комбинированной обратной связью в сочетании с автоматической коррекцией аддитивной погрешности практически использована при разработке цифрового микропроцессорного дозиметра с автономным питанием, предназначенного для допускового контроля уровня излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоровиц, П. Искусство схемотехники [Текст]: в 3 т. Т. 3 / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 367 с.
2. Богданов, Н.Г. Способ повышения чувствительности фотоэлектрических преобразователей [Текст] / Н.Г. Богданов, Ю.Б. Иванов, Д.П. Санников // Телекоммуникации. – 2007. – № 2. – С. 35-38.
3. Богданов, Н.Г. Расширение динамического диапазона фотоэлектрических преобразователей [Текст] / Н.Г. Богданов, Ю.Б. Иванов, Е.Ю. Наумов // Телекоммуникации. – 2007. – № 7. – С. 41-44.

Иванов Борис Рудольфович

Академия ФСО России, г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры
Тел. (4862) 42-08-92
E-mail: brivanov@yandex.ru

Иванов Юрий Борисович

Академия ФСО России, г. Орел
Кандидат технических наук, преподаватель кафедры
Тел. (4862) 42-61-61
E-mail: zhmur@yahoo.com

B.R. IVANOV, Yu.B. IVANOV

**DETECTOR SENSITIVITY INCREASE
OF AUTONOMOUS DIGITAL DOSIMETERS**

The given article is devoted to the required positive feedback amplifiers for using and influencing initial displacement voltage and amplifier input current for offset by automatic additive error correction in radiation detector schemes to individual digital dosimeters sensitivity increase used for environmental variable parameter checkout.

Keywords: digital dosimeter, error correction, measurement automation.

BIBLIOGRAPHY

1. Xorovic, P. Iskusstvo sxemotexniki [Tekst]: v 3 t. T. 3 / P. Xorovic, U. Hill; per. s angl. – М.: Mir, 1993. – 367 s.
2. Bogdanov, N.G. Sposob povysheniya chuvstvitel'nosti fotoe'lektricheskix preobrazovatelej [Tekst] / N.G. Bogdanov, Yu.B. Ivanov, D.P. Sannikov // Telekommunikacii. – 2007. – № 2. – S. 35-38.
3. Bogdanov, N.G. Rasshirenie dinamicheskogo diapazona fotoe'lektricheskix preobrazovatelej [Tekst] / N.G. Bogdanov, Yu.B. Ivanov, E.Yu. Naumov // Telekommunikacii. – 2007. – № 7. – S. 41-44.

Ivanov Boris Rudol'fovich

Academy of Federal Guard Service of Russian Federation, Orel
Doctor of technical science, professor of department
Tel. (4862) 42-08-92
E-mail: brivanov@yandex.ru

Ivanov Yuriy Borisovich

Academy of Federal Guard Service of Russian Federation, Orel
Candidate of technical science, lecturer of department
Tel. (4862) 42-61-61
E-mail: zhmur@yahoo.com

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ РЕГУЛЯТОРОВ ТОКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В работе рассмотрены различные варианты реализации дискретных регуляторов тока АЭП с векторным управлением. Проведенный сравнительный анализ области устойчивости и динамических показателей качества выявил оптимальную структуру регуляторов с прогнозированием вектора статорного тока. Изучены практические ограничения на использование регуляторов с прогнозированием, обусловленные погрешностями определения параметров асинхронного двигателя.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, векторное управление, оптимизация регуляторов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно значительное число работ, посвященных различным аспектам исследования и проектирования асинхронного электропривода (АЭП) с векторным управлением (см., например, литературу, цитируемую в [1, 2]). Большинство известных работ посвящено изучению внешних контуров регулирования и наблюдателей скорости и магнитного потока АЭП, напрямую связанных с технологической спецификой объекта приложения. В качестве исходной предпосылки в таких работах зачастую выступает постулат о том, что внутренние (токовые) контуры АЭП с векторным управлением являются «идеальными повторителями» управляющего сигнала, обладающие точным и быстрым переходным процессом желаемой формы и нулевой статической ошибкой. Плохие динамические характеристики или неустойчивость токовых контуров искажает производительность АЭП также как неточная ориентация системы координат [3, 4].

Очевидно, что необходимой мерой для реализации заданных динамических показателей качества токовых контуров АЭП являются расширение их полосы пропускания. В то же время, из [5, 6] известно, что подобные действия создают предпосылки для потери устойчивости синхронным к периоду импульсной модуляции стационарным процессом и появлению в динамике АЭП сложных субгармонических, квазипериодических и хаотических процессов.

Целью данной работы является анализ возможных подходов к реализации дискретных регуляторов тока АЭП с векторным управлением и выявление оптимального решения с точки зрения динамических характеристик и устойчивости стационарных процессов в АЭП.

АЭП С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Структурная схема АЭП с векторным управлением приведена на рисунке 1 (см. также [1-4]). Математическая модель асинхронного электродвигателя (АД) в неподвижной системе координат (α, β) имеет вид [1, 2]:

$$\frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} = \left(-\frac{1}{\tau_r} + jp_n\omega_r \right) \bar{\Psi}_r + \frac{L_m}{\tau_r} \bar{I}_s; \quad (1.1)$$

$$\frac{d\bar{I}_s}{dt} = \frac{k_r}{\sigma L_s} \left(\frac{1}{\tau_r} - jp_n\omega_r \right) \bar{\Psi}_r - \frac{\bar{I}_s}{\tau_\sigma} + \frac{\bar{U}_s}{\sigma L_s}, \quad (1.2)$$

где $\bar{\Psi}_r$, \bar{I}_s , \bar{U}_s – векторы магнитного потока ротора, тока и напряжения статора АД;

$k_r = L_m / L_r$, $\tau_r = L_r / r_r$, $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$, $\tau_\sigma = \sigma L_s / (r_s + k_r^2 r_r)$ – параметры модели (1), выраженные через первичные параметры АД;

L_r , r_r , L_s , r_s – индуктивности и сопротивления обмоток ротора и статора, соответственно;

L_m – индуктивность намагничивания АД;

p_n – число пар полюсов АД;

ω_r – угловая частота вращения вала АД.

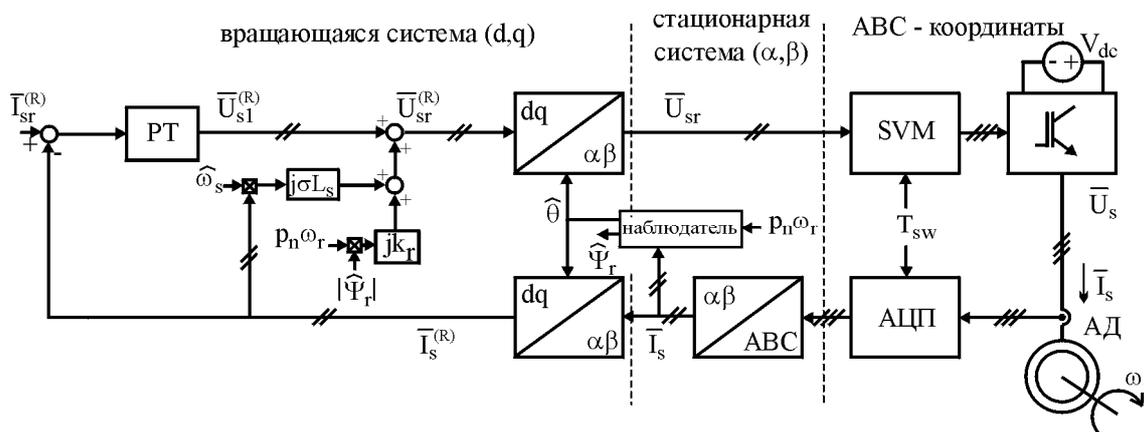


Рисунок 1 – Структурная схема АЭП с векторным управлением

На сегодняшний момент времени традиционным является использование в контурах регулирования тока АЭП ПИ-регуляторов, реализованных во вращающейся (синхронной) системе координат (d, q) [1-6]. Ориентация вращающейся системы координат по вектору магнитного потока ротора, может быть выполнена неявно с использованием наблюдателя потока ротора на основе «токовой модели» в соответствии с [2]:

$$\frac{d\hat{\Psi}_{rd}}{dt} = -\frac{1}{\tau_r} \hat{\Psi}_{rd} + \frac{L_m}{\tau_r} \operatorname{Re}\{\bar{I}_s^{(R)}\}; \quad (2.1)$$

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = p_n \omega_r + \frac{L_m}{\tau_r} \frac{\operatorname{Im}\{\bar{I}_s^{(R)}\}}{\hat{\Psi}_{rd}}. \quad (2.2)$$

Здесь и далее верхний индекс «(R)» определяет принадлежность вектора к вращающейся системе координат, мгновенное расположение которой относительно неподвижной системы определяется углом поворота θ . Знак «^» в (2) и далее использован для выделения «наблюдаемой», а не измеряемой переменной.

Переход от неподвижной системы координат во вращающуюся систему и обратно выполняется с помощью преобразования:

$$\bar{I}_s^{(R)} = \bar{I}_s e^{-j\theta}; \quad \bar{U}_{sr} = \bar{U}_{sr}^{(R)} e^{j\theta}. \quad (3)$$

Математическая модель ПИ-регуляторов проекций тока статора $\bar{I}_s^{(R)}$ имеет вид:

$$\frac{d\bar{U}_c^{(R)}}{dt} = G_d \omega_L d \left(i_{srd} - \operatorname{Re}\{\bar{I}_s^{(R)}\} \right) + j G_q \omega_L q \left(i_{srq} - \operatorname{Im}\{\bar{I}_s^{(R)}\} \right);$$

$$\bar{U}_{sr}^{(R)} = G_d \left(i_{srd} - \operatorname{Re}\{\bar{I}_s^{(R)}\} \right) + j G_q \left(i_{srq} - \operatorname{Im}\{\bar{I}_s^{(R)}\} \right) + \bar{U}_c^{(R)} + j \mu_3 \sigma L_s \frac{d\theta}{dt} \bar{I}_s^{(R)} + j k_r p_n \omega_r \hat{\Psi}_{rd}, \quad (4)$$

где G – коэффициент передачи ПИ-регулятора на частоте, равной бесконечности;

ω_L – «нуль» ПИ-регулятора;

μ_3 – параметр, определяющий отношение значения индуктивности рассеяния в (4) к ее точному значению, используемому в модели АД (1).

Последнее уравнение в (4) учитывает блок динамической развязки и явную компенсацию ЭДС вращения АД на рисунке 1.

Взаимное соответствие между \bar{U}_{sr} (3), (4) и \bar{U}_s из (1) устанавливает блок, реализующий пространственную модуляцию (SVM) опорного вектора статорного напряжения \bar{U}_{sr} (рис. 1). Следуя [5, 6], будем полагать, что на текущем периоде модуляции $\bar{U}_{sr} = \bar{U}_s$ т.к., из анализа [5] следует, что подобное упрощение допустимо для задач исследования динамики АЭП с векторным управлением.

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ТОКА

В общем случае настройка ПИ-регуляторов (4) выполняется на апериодический переходный процесс или на т.н. «технический оптимум» [1, 3, 4]. Для обеих настроек $\omega_L = 1 / \tau_\sigma$ [1], а полоса пропускания замкнутой системы определяется выбором G исходя из следующего приближенного выражения $G = 2,2\sigma L_s / t_{пп}$ с учетом требования к длительности переходного процесса $t_{пп}$. При этом очевидно, что увеличение полосы пропускания АЭП за счет увеличения G улучшает динамические характеристики АЭП в переходном процессе и, соответственно, облегчает задачу построения внешних (технологических) регуляторов скорости, потока и пр. Однако, как показано в [5, 6], существует верхняя граница $G_{крит}$, определяемая из условий устойчивости стационарного процесса в АЭП. Причем конкретное значение $G_{крит}$ зависит от практической реализации регуляторов (4) [5, 6].

Непосредственная реализация управления в соответствии с (2)-(4) предполагает «аналоговую» структуру АЭП [1]. В этом случае опорный вектор фазных напряжений формируется на основании текущих значений фазных токов и текущего положения вектора магнитного потока ротора. При этом, как показано в [6], подобная система характеризуется наивысшим быстродействием и, соответственно, наибольшей допустимой полосой пропускания контуров тока ($G_{крит} \approx 2\pi\sigma L_s / (3T_{sw})$) [6]. Будем называть данную систему АЭП-1. С практической точки зрения АЭП-1 характеризуется высокой стоимостью, поэтому он не находит широкого применения. Дискретная реализация регуляторов тока, обуславливает наличие временных задержек на измерение входных величин и вычисление (2)-(4). Поэтому, любая дискретная реализация АЭП с векторным управлением будет обладать меньшим значением $G_{крит}$ и худшими динамическими показателями качества [6]. Простейшая дискретная реализация регуляторов тока обеспечивает задержку в один период модуляции (АЭП-2):

$$\begin{aligned} \bar{U}_{c(k+1)}^{(R)} &= \bar{U}_{c(k)}^{(R)} + G_d \omega_{Ld} T_{sw} \left(i_{refd} - \operatorname{Re} \left\{ \bar{I}_{sk}^{(R)} \right\} \right) + j G_q \omega_{Lq} T_{sw} \left(i_{refq} - \operatorname{Im} \left\{ \bar{I}_{sk}^{(R)} \right\} \right); \\ \bar{U}_{sr(k+1)}^{(R)} &= G_d \left(i_{srd} - \operatorname{Re} \left\{ \bar{I}_{sk}^{(R)} \right\} \right) + j G_q \left(i_{srq} - \operatorname{Im} \left\{ \bar{I}_{sk}^{(R)} \right\} \right) + \bar{U}_{c(k+1)}^{(R)} + j \mu_3 \sigma L_s \frac{d\theta_k}{dt} \bar{I}_{sk}^{(R)} + j k_r p_n \omega_r \Phi_{rdk}; \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + T_{sw} \left(p_n \omega_r + \frac{L_m}{\mu_1 \tau_r} \frac{\operatorname{Im} \left\{ \bar{I}_{sk}^{(R)} \right\}}{\Phi_{rdk}} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Характеристики переходного процесса изменения уставки q -проекции тока статора $i_{sqref} = 15 \text{ А} \rightarrow i_{sqref} = 10 \text{ А}$ для АЭП-2 показаны пунктирной линией на рисунках 2-4 для различных погрешностей в развязке d - и q -каналов регулирования тока. В качестве объекта для моделирования рассматривался АЭП установленной мощности 5,5 кВт с параметрами: $L_s = 0,258 \text{ Гн}$, $L_r = 0,262 \text{ Гн}$, $L_m = 0,254 \text{ Гн}$, $r_s = 1,037 \text{ Ом}$, $r_r = 0,757 \text{ Ом}$, $p_n = 1$, $T_{sw} = 333,3 \text{ мкс}$, $i_{sdref} = 3,15 \text{ А}$, $\omega_L = 148,5 \text{ рад/с}$. Критическое значение полосы пропускания для АЭП-2 определено в [6] $G_{крит} \approx 2\pi\sigma L_s / (6T_{sw})$. Для рассматриваемых значений параметров $G_{крит} \approx 37,4$. Из рассмотрения рисунков 2-4 следует, что значения $G < 10$ обеспечивают настройку на «технический оптимум», в то время как настройка на апериодический переходный процесс для АЭП-2 не может быть произведена ни при каких значениях G .

В качестве попытки усовершенствовать АЭП-2 (5) можно рассматривать упреждающую коррекцию вектора статорного напряжения (АЭП-3), при которой

$$\bar{I}_{sk}^{(R)} = \bar{I}_{sk} e^{-j\theta_k}; \bar{U}_{sr(k+1)} = \bar{U}_{sr(k+1)}^{(R)} e^{j\theta_{(k+1)}}. \quad (6)$$

Дополнительно к (6) в АЭП-3 имеется возможность использовать вычисленные на текущем k -такте значения потока ротора с $(k+1)$ -такта. Характеристики переходного процесса для АЭП-3 показаны штриховой линией на рисунках 2-4.

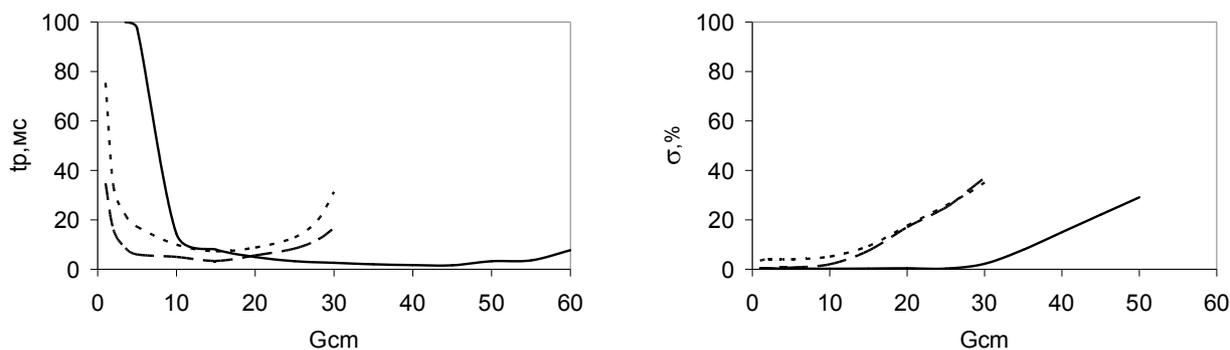


Рисунок 2 – Длительность переходного процесса t_p и величина перерегулирования σ в зависимости от полосы пропускания регуляторов тока (развязка d - и q -каналов идеальная $\mu_3 = 1$)

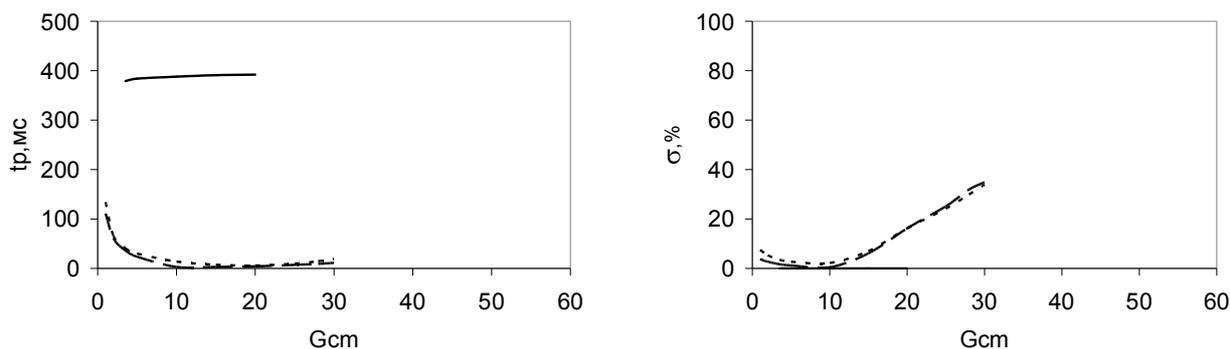


Рисунок 3 – Длительность переходного процесса t_p и величина перерегулирования σ в зависимости от полосы пропускания регуляторов тока (индуктивность рассеяния в модели недооценена $\mu_3 = 0,5$)

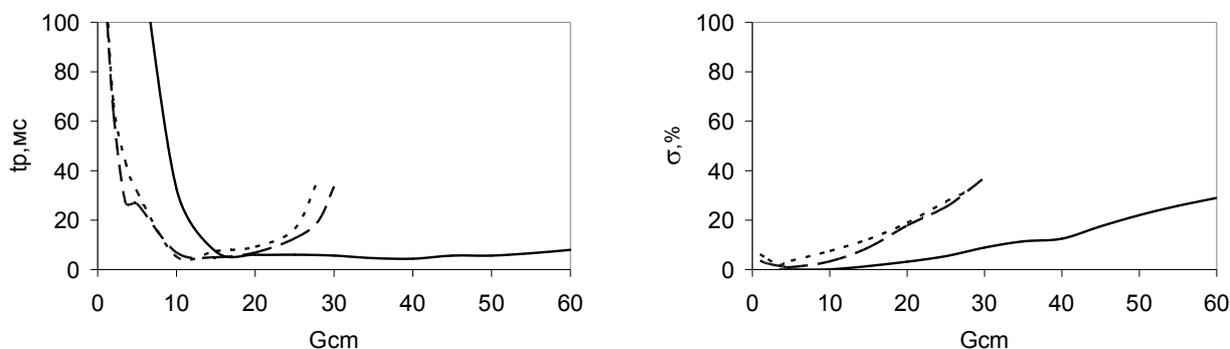


Рисунок 4 – Длительность переходного процесса t_p и величина перерегулирования σ в зависимости от полосы пропускания регуляторов тока (индуктивность рассеяния в модели переоценена $\mu_3 = 1,5$)

Очевидно, что значения $G < 10$ обеспечивают настройку на аperiodический переходный процесс, в то время как настройка на «технический оптимум» обеспечивается для $G_{TO} \approx 13$. В целом отличие АЭП-3 от АЭП-2 незначительное. В частности, обе рассмотренные реализации регуляторов тока характеризуются подобными областями устойчивости синхронного стационарного процесса в пространстве параметров АЭП.

Существенного улучшения динамических показателей векторного АЭП можно добиться, используя предлагаемый способ прогнозирующего регулирования тока статора (АЭП-4). Основная идея способа заключается в вычислении (прогнозировании) вектора статорного тока АД $\bar{I}_{s(k+1)}^{(R)}$ с использованием эталонной модели (1.2). Преобразуя (1.2) во вращающуюся систему координат, а также, допуская предположение об идеальной ориентации

вектора потока ротора, вычисляемого наблюдателем (2), можно получить прогнозируемое значение вектора статорного тока в виде

$$\bar{I}_{s(k+1)}^{(R)} = \bar{I}_{sk}^{(R)} + T_{sw} \frac{k_r}{\mu_3 \sigma L_s} \left(\frac{1}{\mu_1 \tau_r} - j p n \omega_r \right) \bar{I}_{rdk} + T_{sw} \left(\frac{\bar{U}_{sk}^{(R)}}{\mu_3 \sigma L_s} - \left(\frac{1}{\mu_3 \tau_\sigma} + j \frac{d\theta_k}{dt} \right) \bar{I}_{sk}^{(R)} \right). \quad (7)$$

Характеристики переходного процесса для АЭП-4, использующего результат вычисления (7) при расчете регуляторов по (5) показаны сплошной линией на рисунках 2-4. Область устойчивости для регуляторов с прогнозированием (7), (5) и переоцененной индуктивности рассеяния машины максимально возможная $G_{\text{крит}} \approx 2\pi\sigma L_s / (3T_{sw})$. Для рассматриваемых значений параметров $G_{\text{крит}} \approx 74,8$. При этом апериодический переходный процесс может быть получен для значений $G < 26$, в то время как настройка на «технический оптимум» обеспечивается для $G_{\text{То}} \approx 30$. Указанные результаты более чем в два раза лучше АЭП-3 с упреждающей коррекцией вектора статорного напряжения. В то же время, для случая недооцененной индуктивности рассеяния область устойчивости АЭП-4 с прогнозирующим регулированием существенно (на 40 %) сократилась по сравнению с АЭП-2 и АЭП-3, что является вполне обоснованным результатом исходя из эталонной модели (7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены различные варианты реализации дискретных регуляторов тока АЭП с векторным управлением. Сравнительный анализ области устойчивости и динамических показателей качества выявил существенное преимущество предлагаемого способа реализации регуляторов с прогнозированием вектора статорного тока. Использование прогнозирования позволяет существенно расширить полосу пропускания замкнутого АЭП, что улучшает его динамические характеристики и упрощает настройку внешних (технологических) регуляторов скорости (положения), потока и пр. Практическая реализация предлагаемых регуляторов предполагает некоторое завышение величины индуктивности рассеяния относительно паспортного значения для АД, необходимое для устойчивой работы прогнозирующей модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением [Текст] / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Novotny, D.W. Vector control and dynamics of AC drives [Text] / D.W. Novotny, T.A. Lipo. – Oxford: Clarendon press, 1997.
3. Holtz, J. Design of fast and robust current regulators for high power drives based on complex state variables [Text] / J. Holtz, J. Quan, G. Schmitt [ets.]. – Salt-Lake City: IEEE IAS Annual Meeting, 2003.
4. Briz del Blanco, F. Dynamic analysis of current regulators for AC motors using complex vectors [Text] / F. Briz del Blanco, M.W. Degner, R.D. Lorenz // IEEE Trans. Industry Applicat. – 1999. – Vol. 35. – № 6. – P. 1424-1432.
5. Колоколов, Ю.В. Бифуркационные явления в динамике асинхронного электропривода с векторным управлением [Текст] / Ю.В. Колоколов, С.Л. Косчинский // Техническая электродинамика, спец. выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2004. – Т. 3. – С. 128-131.
6. Колоколов, Ю.В. Механизмы потери устойчивости стационарными процессами в асинхронном электроприводе с векторным управлением [Текст] / Ю.В. Колоколов, С.Л. Косчинский // «Электроприводы переменного тока»: материалы 13-й конференции. – Екатеринбург, 2005. – С.148-151.

Косчинский Станислав Леонидович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»

Тел. (4862) 41-98-79

E-mail: koschinsky@rambler.ru

S.L. KOSCHINSKIJ

**TO THE PROBLEM OF OPTIMAL CURRENT CONTROLLERS
SYNTHESIS OF INDUCTION MOTOR DRIVE**

The paper concerns to the problem of optimal discrete-time current controllers synthesis of induction motor drive with vector control. The comparative study of different calculation strategies of current controllers has been presented. The results of comparative analysis of transient performance and domain of stability revealed optimal strategy of current controller calculation with extrapolation technique. The limitations of proposed current controller calculation strategy have been revealed with respect to motor parameter uncertainties.

Keywords: induction motor drive, vector control, controller optimal design.

BIBLIOGRAPHY

1. Rudakov, V.V. Asinxronny'e e`lektroprivody' s vektorny'm upravleniem [Tekst] / V.V. Rudakov, I.M. Stolyarov, V.A. Dartau. – L.: E`nergoatomizdat, 1987.
2. Novotny, D.W. Vector control and dynamics of AC drives [Text] / D.W. Novotny, T.A. Lipo. – Oxford: Clarendon press, 1997.
3. Holtz, J. Design of fast and robust current regulators for high power drives based on complex state variables [Text] / J. Holtz, J. Quan, G. Schmitt [ets.]. – Salt-Lake City: IEEE IAS Annual Meeting, 2003.
4. Briz del Blanco, F. Dynamic analysis of current regulators for AC motors using complex vectors [Text] / F. Briz del Blanco, M.W. Degner, R.D. Lorenz // IEEE Trans. Industry Applicat. – 1999. – Vol. 35. – № 6. – P. 1424-1432.
5. Kolokolov, Yu.V. Bifurkacionny'e yavleniya v dinamike asinxronnogo e`lektroprivoda s vektorny'm upravleniem [Tekst] / Yu.V. Kolokolov, S.L. Koschinskij // Texnicheskaya e`lektrodinamika, spec. vy'pusk "Silovaya e`lektronika i e`nergoe`ffektivnost'». – 2004. – T. 3. – S. 128-131.
6. Kolokolov, Yu.V. Mexanizmy' poteri ustojchivosti stacionarny'mi processami v asinxronnom e`lektroprivode s vektorny'm upravleniem [Tekst] / Yu.V. Kolokolov, S.L. Koschinskij // «E`lektroprivody' peremennogo toka”: materialy' 13-j konferencii. – Ekaterinburg, 2005. – S.148-151.

Koschinskij Stanislav Leonidovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Doctor of technical science, professor of department “Electronics, Computers and Information Security”

Tel. (4862) 419879

E-mail: koschinsky@rambler.ru

УДК 629.423.31

А.С. КОСМОДАМИАНСКИЙ, В.И. ВОРОБЬЕВ, А.А. ПУГАЧЕВ

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК

Представлена сравнительная оценка способов скалярного частотного управления асинхронным двигателем по минимуму тока статора и с постоянством абсолютного скольжения с учетом температуры обмоток двигателя. Приведены результаты расчета для тягового двигателя ЭД-900.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, нагрев обмоток, минимум тока, постоянство абсолютного скольжения

Регулирование электромагнитного момента и частоты вращения асинхронного двигателя в электроприводах с частотными системами управления может осуществляться следующими способами [1-4]:

- изменением модуля вектора того или иного потокосцепления за счет воздействия на амплитуду и частоту входного сигнала силового канала (напряжения или тока статора);
- изменением модуля и пространственного положения (непрерывного или дискретного с точностью до сектора) вектора потокосцепления за счет искусственного разделения канала управления на контуры непосредственного или косвенного регулирования момента и выбранного потокосцепления.

Второй способ, к которому относятся системы векторного управления и прямого управления моментом, является более современным и совершенным, однако и гораздо более сложным и требовательным к элементной базе, программному обеспечению и точности информационно-измерительных преобразователей.

Первый способ, получивший название скалярного управления, до сих пор является широко распространенным и находит свое применение в различных отраслях промышленности и транспорта. Так, электроприводы со скалярным управлением используются в качестве тяговых на электровозах ВЛ80^А, тепловозах ТЭ120, ТЭМ21, ряде тепловозов и электровозов зарубежного производства; возможность использования систем скалярного управления также предусмотрена на современном тепловозе 2ТЭ25А.

В системах скалярного управления при одновременном регулировании магнитного потока и частоты его вращения относительно ротора возможно выявление рационального (оптимального) режима управления по минимуму тока статора, которое необходимо для обеспечения ограничения нагрева двигателя и расширения области допустимых по нагреву моментов нагрузки.

В связи с этим, традиционно наиболее популярными являются способы скалярного управления в замкнутых системах при постоянстве абсолютного скольжения и минимума тока статора. В ряде работ [4-6] проводятся исследования одного или другого способа частотного управления, однако в них отсутствует анализ и сравнительная оценка влияния температуры на эти способы управления. Авторами данной статьи поставлена задача восполнить этот пробел и рассмотреть режимы работы и характеристики асинхронного двигателя при его питании от получающего все более широкое применение автономного инвертора напряжения с учетом теплового состояния обмоток статора и ротора.

На основании Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя в работах [1, 3] приводятся соотношения координат и параметров двигателя, с помощью которых целесообразно выявление и исследование оптимальных способов частотного управления.

Исходя из предложенных соотношений, запишем зависимости относительного тока статора I_{1*} и относительного электромагнитного момента M_* от абсолютного скольжения s_q :

$$I_{1*} = U_{1*} \sqrt{\frac{R_2'^2 / X_\mu^2 + s_a^2 (1 + L_{2\sigma}' / L_\mu)^2}{K_1^2 s_a^2 + K_2^2 R_2'^2 + 2R_1 R_2' f_{1*} s_a}}; \quad (1)$$

$$M_* = \frac{3U_{1*}^2 R_2' s_a}{\omega_0 (K_1^2 s_a^2 + K_2^2 R_2'^2 + 2R_1 R_2' f_{1*} s_a)}; \quad (2)$$

где $K_1 = \sqrt{R_1^2 (1 + L_{2\sigma}' / L_\mu)^2 + f_{1*}^2 \omega_0^2 L_\mu^2 \sigma^2}$;

$$K_2 = \sqrt{R_1^2 / X_\mu^2 + f_{1*}^2 (1 + L_{1\sigma}' / L_\mu)^2};$$

$\sigma = L_{1\sigma}' / L_\mu + L_{2\sigma}' / L_\mu + L_{1\sigma}' L_{2\sigma}' / L_\mu^2$ – коэффициент рассеяния обмоток двигателя;

$L_{1\sigma}'$, $L_{2\sigma}'$, L_μ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора и главная взаимная индуктивность соответственно;

$X_\mu = \omega_0 L_\mu$ – индуктивное сопротивление;

R_1 , R_2' – сопротивление статора и приведенное сопротивление ротора соответственно;

$s_a = (\omega_0 - \omega) / \omega_{0ном}$ – абсолютное скольжение;

ω , ω_0 , $\omega_{0ном}$ – частоты вращения вала ротора, а также магнитного поля при текущей или номинальной частоте тока статора соответственно;

$U_{1*} = \frac{U_1}{U_{1ном}}$, $f_{1*} = \frac{f_1}{f_{1ном}}$ – относительные значения напряжения и частоты тока статора

соответственно;

U_1 , $U_{1ном}$, f_1 , $f_{1ном}$ – текущие и номинальные значения напряжения и частоты тока статора соответственно.

Для оценки эффективности управления с точки зрения реализации необходимого момента воспользуемся понятием коэффициента добротности [5]:

$$k_d = \frac{M_*}{I_{1*}},$$

где $M_* = \frac{M}{M_{ном}}$ и $I_{1*} = \frac{I_1}{I_{1ном}}$ – относительные значения момента и тока статора соответственно, определяются по выражениям (1), (2);

M , $M_{ном}$, I_1 , $I_{1ном}$ – текущие и номинальные значения момента и тока статора соответственно.

В работе [4] показано, что для получения корректных качественных и количественных характеристик асинхронного двигателя при его частотном управлении необходимо учитывать влияние насыщения по главному магнитному пути. В связи с этим при расчете характеристик использовалась рекомендованная в работах [7, 8] следующая характеристика намагничивания:

$$L_\mu = -0,002 I_{\mu*}^6 + 0,037 I_{\mu*}^5 - 0,261 I_{\mu*}^4 + 0,87 I_{\mu*}^3 - 1,278 I_{\mu*}^2 + 0,214 I_{\mu*} + 1,413.$$

Относительный ток намагничивания:

$$I_{\mu*} = \frac{I_\mu}{I_{\muном}} = U_{1*} \sqrt{\frac{R_2'^2 / X_\mu^2 + s_a^2 (L_{2\sigma}' / L_\mu)^2}{K_1^2 s_a^2 + K_2^2 R_2'^2 + 2R_1 R_2' f_{1*} s_a}}.$$

Наибольшее значение ток намагничивания имеет в режиме холостого хода. При отклонениях от этого режима происходит существенное уменьшение тока намагничивания, что вызывает соответствующее уменьшение главного магнитного потока. Поэтому для работы двигателя с постоянным магнитным потоком необходимо изменять ток статора в функции скольжения.

Увеличение температуры обмоток тягового асинхронного двигателя во время работы неизбежно приводит к изменению его характеристик, что влечет изменение параметров системы управления асинхронным двигателем. Это, в свою очередь, может вызвать ухудшение эффективности работы электропривода в связи с уменьшением коэффициента добротности. Для исследования влияния температуры на работу асинхронного двигателя при указанных законах управления используем следующую зависимость активного сопротивления обмоток от температуры:

$$R = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_{20})],$$

где R_{20} – сопротивление обмотки при температуре $T_{20} = 20$ °С;

T – текущая температура обмотки;

α – температурный коэффициент сопротивления (для меди $\alpha = 0,00433$).

Расчет основных характеристик асинхронного двигателя приведем на примере теплового электродвигателя ЭД-900.

Параметры электродвигателя ЭД-900 следующие [9]: $U_{1\text{НОМ}} = 362$ В; $I_{1\text{НОМ}} = 432$ А; $P_{\text{НОМ}} = 380$ кВт; $2p = 6$; $f_{1\text{НОМ}} = 24$ Гц; $X_1 = 0,114$ Ом; $X_2' = 0,119$ Ом; $R_1 = 0,0347$ Ом; $R_2' = 0,0304$ Ом, где $P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность электродвигателя, $2p$ – число полюсов обмотки статора, X_1 , X_2' – индуктивное сопротивление статора и приведенное индуктивное сопротивление ротора соответственно.

Для построения зависимостей тока статора от абсолютного скольжения определяем из выражения (2) напряжение и подставляем его в выражение (1). Зависимости относительного тока статора и коэффициента добротности от абсолютного скольжения при различных температурах и фиксированных значениях момента приведены на рисунке 1.

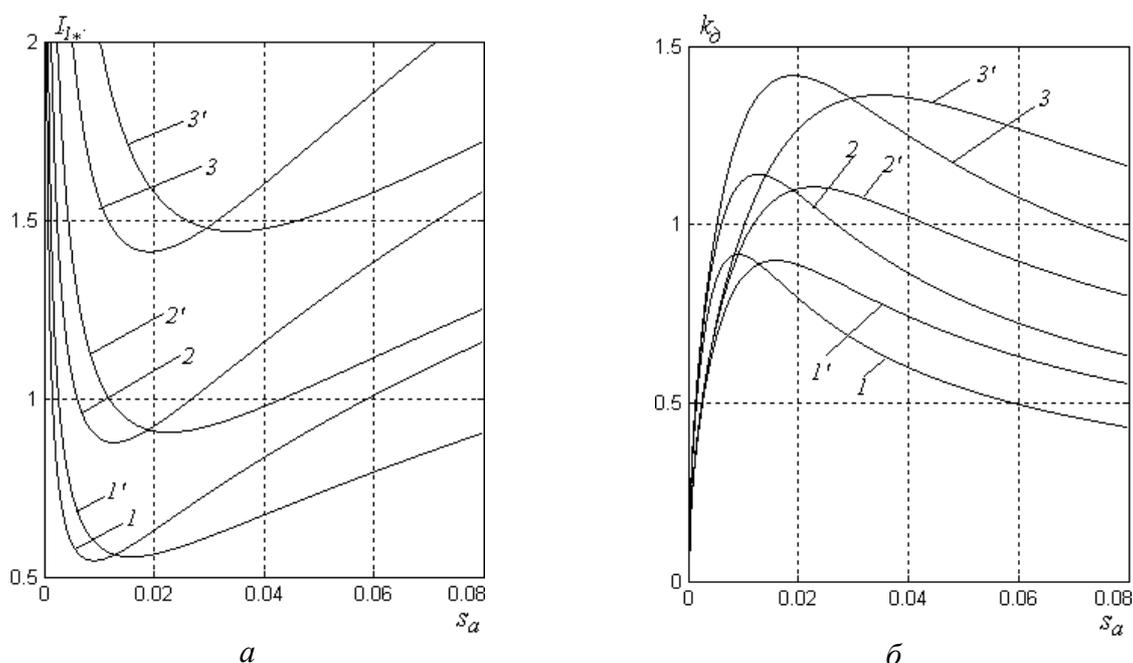


Рисунок 1 – Зависимость относительного тока статора (а) и коэффициента добротности (б) от абсолютного скольжения
 1 – $M_* = 0,5$, $T = 20$ °С; 1' – $M_* = 0,5$, $T = 180$ °С; 2 – $M_* = 1$, $T = 20$ °С;
 2' – $M_* = 1$, $T = 180$ °С; 3 – $M_* = 2$, $T = 20$ °С, 3' – $M_* = 2$, $T = 180$ °С

Анализ зависимостей, приведенных на рисунке 1, показывает, что кривые тока статора имеют явно выраженный минимум, а кривые коэффициента добротности – явно выраженный максимум, которому соответствует определенное значение абсолютного скольжения. При увеличении момента абсолютное скольжение, обеспечивающее минимум тока статора, смещается в сторону больших значений. При увеличении температуры обмоток минимум тока также смещается в сторону больших скольжений, что объясняется повышением активного сопротивления обмотки ротора. При этом также увеличивается и само значение минимального тока, на которое решающее воздействие оказывает увеличение активного сопротивления обмотки статора. Поскольку активное сопротивление статора гораздо меньше индуктивного сопротивления короткого замыкания, которое также влияет на ток статора, то эффект увеличения минимального тока прослеживается в гораздо меньшей степени, чем эффект увеличения абсолютного скольжения при повышении температуры обмоток.

В таблице 1 показаны сравнительные данные по величинам основных параметров частотно-регулируемого электропривода с асинхронным двигателем, включая частоту тока ротора $f_2 = s_a f_{1ном}$, для способов управления с постоянством абсолютного скольжения и минимума тока статора. Для иллюстрации скалярного управления с постоянством абсолютного скольжения выбрано скольжение, обеспечивающее минимум тока статора при номинальном моменте сопротивления и температуре обмоток 20 °С.

Таблица 1 – Основные параметры сравниваемых способов скалярного управления

Способ управления	Параметр	M_*								
		0,5			1,0			2,0		
		20 °С	100 °С	180 °С	20 °С	100 °С	180 °С	20 °С	100 °С	180 °С
Минимум тока статора	$s_{aопт}$, %	0,9	1,24	1,57	1,26	1,74	2,26	1,91	2,67	3,46
	$f_{2опт}$, Гц	0,216	0,298	0,377	0,302	0,418	0,542	0,458	0,641	0,83
	I_{1*}	0,546	0,551	0,556	0,877	0,891	0,905	1,411	1,445	1,465
	k_D	0,916	0,908	0,899	1,14	1,123	1,105	1,417	1,385	1,362
Постоянство абсолютного скольжения	s_a , %	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
	f_2 , Гц	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302
	I_{1*}	0,562	0,551	0,563	0,877	0,914	0,961	1,471	1,645	1,83
	k_D	0,891	0,907	0,888	1,14	1,094	1,019	1,359	1,216	1,093

Анализ таблицы 1 показывает, что при отклонении абсолютного скольжения от оптимального значения происходит возрастание тока статора и соответствующее ему уменьшение коэффициента добротности, что вызывает ухудшение энергетических показателей электропривода и приводит к большему нагреву обмоток и массива статора и ротора. Увеличение температуры наиболее сильное влияние оказывает при действии больших моментов. Разница в токах и коэффициентах добротности на рассматриваемом диапазоне температур при $M_* = 0,5$ для первого способа составляет 1 % от номинального тока и 1,7 % от номинального коэффициента добротности соответственно, для второго способа – 0,1 % и 0,3 %; при $M_* = 2$ для первого способа – 5,4 % и 5,5 %, для второго способа – 35,9 % и 26,6 %. Это говорит о том, что способ управления при постоянстве абсолютного скольжения гораздо менее восприимчив к изменению температуры при низких моментах, чем управление по минимуму тока статора. Разница в оптимальных значениях абсолютных скольжений при $M_* = 0,5$ составляет 0,67 %, при $M_* = 2$ – 1,55 %. Таким образом, увеличение температуры обмоток приводит к резкому снижению эффективности управления при постоянстве абсолютного скольжения по сравнению с поддержанием минимального значения тока статора.

Подобные исследования были проведены и для пониженных частот тока статора. При пониженных частотах сохраняется тенденция увеличения минимального тока и оптимального значения скольжения при увеличении температуры или момента. Причем чем ниже частота тока статора, тем в наибольшей степени проявляется влияние температуры обмоток двигателя. Сами минимальные значения тока несколько превышают значения тока при номинальной частоте напряжения питания точно так же, как и оптимальные значения абсолютного скольжения с понижением частоты увеличиваются при тех же самых значениях температуры и момента. Это приводит к еще более значительному снижению эффективности регулирования с постоянством абсолютного скольжения в зоне больших моментов.

С точки зрения реализации подобных систем управления асинхронными двигателями имеет практический смысл определение значения напряжения, подаваемого на обмотку статора. Очевидно, что для регулирования частоты тока ротора или абсолютного скольжения, при заданной частоте тока статора необходимо изменять величину питающего напряжения. Для анализа влияния выбранного способа управления, а также температуры обмоток двигателя на напряжение статора были рассчитаны и построены зависимости относительного напряжения от относительного момента для различных частот тока статора (рис. 2).

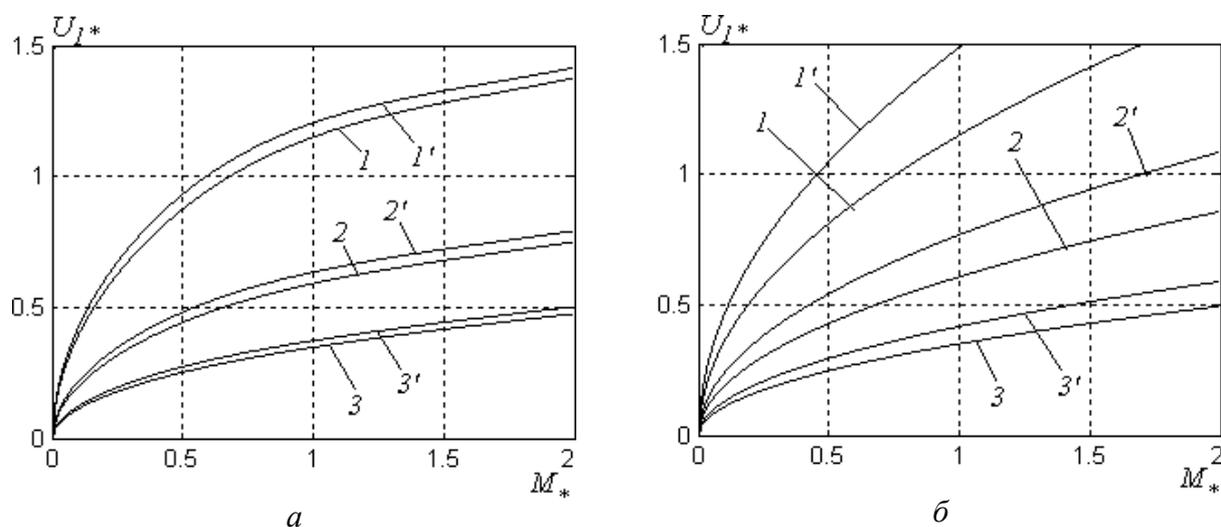


Рисунок 2 – Зависимость относительного напряжения при управлении по минимуму тока статора (а) и с постоянством абсолютного скольжения $s_n=0,126$ (б) от относительного момента
 $1 - f_{1*} = 1, T = 20^\circ\text{C}, 1' - f_{1*} = 1, T = 180^\circ\text{C}; 2 - f_{1*} = 0,5, T = 20^\circ\text{C}, 2' - f_{1*} = 0,5, T = 180^\circ\text{C};$
 $3 - f_{1*} = 0,25, T = 20^\circ\text{C}, 3' - f_{1*} = 0,25, T = 180^\circ\text{C}$

Напряжение, подаваемое на статор при номинальном моменте, номинальной частоте тока статора и температуре $T = 20^\circ\text{C}$, в обоих случаях превышает свое номинальное значение на 16 %. Для способа управления при постоянстве абсолютного скольжения влияние температуры на значения напряжения в большей степени проявляется в зоне больших моментов; в то время как при управлении по минимуму тока статора имеет место противоположная ситуация: увеличение температуры в несколько меньшей степени сказывается в зоне больших моментов (5,1 % при $M_* = 0,5$ и 4 % при $M_* = 2$). Это явление объясняется тем, что при поддержании тока статора на минимальном значении с увеличением температуры и момента происходит увеличение и абсолютного скольжения, что приводит к менее интенсивному возрастанию напряжения питания статора.

С уменьшением частоты тока статора разница между напряжениями, необходимыми для реализации рассматриваемых способов регулирования при различных температурах заметно снижается. Кроме этого, анализ рисунка 2 показывает, что диапазон регулирования напряжения при первом способе управления (рис. 2, а) значительно ниже, чем при втором способе (рис. 2, б). Так, разница напряжений в долях от номинального при $M_* = 1$ на рассматриваемом диапазоне температур составляет от 3,1 % при $f_{1*} = 0,25$ до 4,9 % при $f_{1*} = 1$

для первого способа и от 4,9 % до 43,6 % соответственно для второго. Очевидно, что поддержание напряжения на уровне $U_{1*} = 1,49$ затруднительно по условиям пробоя изоляции, поэтому для технической реализации этого способа необходимо либо поддерживать постоянным большее значение абсолютного скольжения, что ведет к худшим показателям при малых значениях момента, либо прибегать к одновременному регулированию частоты тока статора, что ведет к значительному усложнению системы скалярного управления.

В заключении следует отметить очевидное преимущество систем скалярного управления, работающих по принципу минимума тока статора, которые поддерживают требуемое значение момента с меньшими значениями тока статора, напряжения статора, а следовательно, и с меньшим значением магнитного потока, что приводит к увеличению коэффициента добротности и снижению электромагнитных нагрузок. Вместе с этим, проведенный анализ показал необходимость учета влияния температуры обмоток на значения напряжения статора и параметры системы управления в связи с влиянием на величины минимума тока статора и, особенно, оптимального абсолютного скольжения, обеспечивающего экстремальное управление по минимуму тока статора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями [Текст] / А.А. Усольцев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
2. Федяева, Г.А. Прогнозирование динамических процессов при нестационарных и аварийных режимах тягового электропривода с асинхронными двигателями [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03; 05.22.07 / Федяева Галина Анатольевна. – Москва, 2008. – 39 с.
3. Башарин, А.В. Управление электроприводами [Текст] / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
4. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод [Текст] / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
5. Пармас, Я.Ю. Принципы регулирования момента асинхронных тяговых двигателей локомотивов [Текст] / Я.Ю. Пармас // Тяговый электропривод. – 1967. – Вып. 261. – С. 68-74.
6. Чащин, В.В. Повышение эффективности работы асинхронного тягового электродвигателя с учетом его теплового состояния [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01, 05.09.01 / Чащин Виктор Вячеславович. – Москва, 2004. – 179 с.
7. Новиков, С.Е. Исследование безредукторных электроприводов с частотно-управляемыми низкоскоростными асинхронными двигателями [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.09.03 / Новиков Сергей Евгеньевич. – Москва, 2011. – 20 с.
8. Справочник по автоматизированному электроприводу [Текст] / Под ред. В.А. Елисева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
9. Физический эксперимент и моделирование в машиностроении [Текст]: монография / О.В. Измеров [и др.]. – Орел: ОрелГТУ, 2009. – 452 с.

Космодамианский Андрей Сергеевич

Российская открытая академия транспорта (филиал МГУПС) (РОАТ МИИТ), г. Москва
Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав»
125808, г. Москва, ул. Часовая, 22/2
E-mail: askosm@yandex.ru

Воробьев Владимир Иванович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы»
241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7
Тел. (4832) 56-02-61

Пугачев Александр Анатольевич

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы»
241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7
Тел. (4832) 56-36-02
E-mail: alexander-pugachev@rambler.ru

A.S. KOSMODAMIANSKIJ, V.I. VOROB'YOV, A.A. PUGACHYOV

COMPARATIVE ESTIMATION OF DIFFERENT WAYS OF SCALAR CONTROL OF THE TRACTION INDUCTION MOTOR TAKING INTO ACCOUNT THE TEMPERATURE OF WINDINGS

The comparative appraisal of scalar methods of the induction machine frequency control taking into account the machine windings temperature are represented. Scalar methods of both stator current minimum and absolute slip constancy are considered. Calculation results for ED-900 tractive machine are presented.

Keywords: asynchronous machine, windings heating, current minimum, absolute slip constancy

BIBLIOGRAPHY

1. Usol'cev, A.A. Chastotnoe upravlenie asinxronny'mi dvigatelyami [Tekst] / A.A. Usol'cev. – SPb.: SPbGU ITMO, 2006. – 94 s.
2. Fedyaeva, G.A. Prognozirovanie dinamicheskix processov pri nestacionarny'x i avarijny'x rezhimax tyagovogo e'lektroprivoda s asinxronny'mi dvigatelyami [Tekst]: avtoref. dis. ... dokt. texn. nauk: 05.09.03; 05.22.07 / Fedyaeva Galina Anatol'evna. – Moskva, 2008. – 39 s.
3. Basharin, A.V. Upravlenie e'lektroprivodami [Tekst] / A.V. Basharin, V.A. Novikov, G.G. Sokolovskij. – L.: E'nergoizdat, 1982. – 392 s.
4. Braslavskij, I.Ya. E'nergoberegayushhij asinxronny'j e'lektroprivod [Tekst] / I.Ya. Braslavskij, Z.Sh. Ishmatov, V.N. Polyakov. – M.: Akademiya, 2004. – 256 s.
5. Parmas, Ya.Yu. Principy' regulirovaniya momenta asinxronny'x tyagovy'x dvigatelej lokomotivov [Tekst] / Ya.Yu. Parmas // Tyagovy'j e'lektroprivod. – 1967. – Vy'p. 261. – S. 68-74.
6. Chashhin, V.V. Povy'shenie e'ffektivnosti raboty' asinxronnogo tyagovogo e'lektrodvigatelya s uchytom ego teplovogo sostoyaniya [Tekst]: dis. ... kand. texn. nauk: 05.14.01, 05.09.01 / Chashhin Viktor Vyacheslavovich. – Moskva, 2004. – 179 s.
7. Novikov, S.E. Issledovanie bezreduktorny'x e'lektroprivodov s chastotno-upravlyaemy'mi nizkoskorostny'mi asinxronny'mi dvigatelyami [Tekst]: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk.: 05.09.03 / Novikov Sergej Evgen'evich. – Moskva, 2011. – 20 s.
8. Spravochnik po avtomatizirovannomu e'lektroprivodu [Tekst] / Pod red. V.A. Eliseeva, A.V. Shinyanskogo. – M.: E'nergoatomizdat, 1983. – 616 s.
9. Fizicheskij e'ksperiment i modelirovanie v mashinostroenii [Tekst]: monografiya / O.V. Izmerov [i dr.]. – Orel: OrelGTU, 2009. – 452 s.

Kosmodamianskij Andrej Sergeevich

Russian Open Academy of Transport (branch of MSURE) (ROAT MIIT), Moscow
Doctor of technical science, head of department “Traction rolling stock”
125808, Moscow, ul. Chasovaya, 22/2
E-mail: askosm@yandex.ru

Vorob'yov Vladimir Ivanovich

Bryansk State Technical University, Bryansk
Candidate of technical science, associate professor of department “Locomotives”
241035, Bryansk, bul'var 50-letiya Oktyabrya, 7
Tel. (4832) 56-02-61

Pugachyov Aleksandr Anatol'evich

Bryansk State Technical University, Bryansk
Candidate of technical science, associate professor of department “Electronic, Radio-Electronic and Electro-Technical Systems”
241035, Bryansk, bul'var 50-letiya Oktyabrya, 7
Tel. (4832) 56-36-02
E-mail: alexander-pugachev@rambler.ru

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 620.179.14

П.Н. ШКАТОВ, Д.В. КОЛОСКОВ

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВЫХ КАНАВОК РОТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН

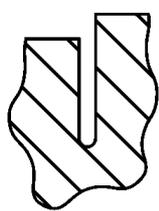
В статье приведены результаты исследований специализированного вихретокового преобразователя для дефектоскопии роторов паровых турбин. Даны рекомендации по выбору рациональных параметров вихретокового преобразователя. Получены зависимости его выходного сигнала от параметров дефекта и влияния мешающих факторов.

Ключевые слова: вихретоковый метод, тепловая канавка, ротор, паровая турбина, дефект.

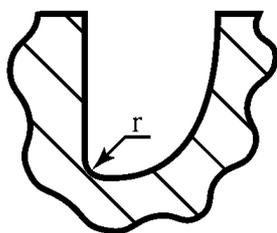
Наиболее дорогостоящие и технически сложные в изготовлении и эксплуатации элементы энергооборудования – паровые турбины. Именно ресурсу их работы уделяется основное внимание при рассмотрении вопросов технического перевооружения энергетической отрасли. Ресурс паровых турбин тепловых электростанций (ТЭС) в значительной степени определяется наиболее ответственными элементами – роторами высокого и среднего давления. Опыт эксплуатации энергооборудования ТЭС показал, что наиболее уязвимые элементы роторов – кромки лопаток, донная часть тепловых канавок и галтельных переходов, поверхность осевого канала.

В МГУПИ, по заданию Всероссийского теплотехнического института (ВТИ), был разработан и внедрен комплекс вихретоковых приборов и систем для оценки технического состояния высоконагруженных элементов роторов в процессе эксплуатации. Он включает вихретоковый дефектоскоп «ЗОНД ВД-96» со специализированными вихретоковыми преобразователями. Настоящая статья посвящена теоретическому исследованию вихретокового преобразователя ВТПУЗ×8, предназначенного для дефектоскопии тепловых канавок и галтельных переходов ротора.

Наиболее вероятно появление трещин в дне тепловой канавки и на участке в окрестности нижней точки галтели (рис. 1). Тепловая канавка имеет ширину 3 мм и глубину 8 мм. В процессе эксплуатации ее поверхность покрывается слоем окалины, удалить который достаточно сложно.



а



б

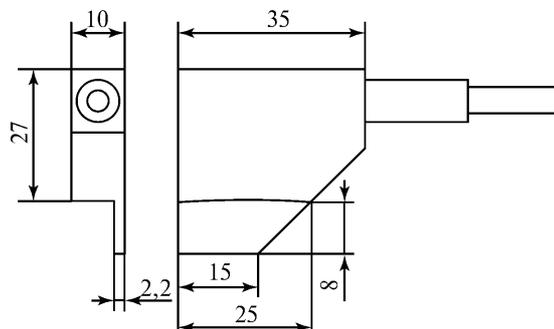


Рисунок 1 – Поперечные сечения тепловой канавки (а) и галтельного перехода (б) ротора

Рисунок 2 – Вихретоковый преобразователь ВТПУЗ×8

Была поставлена задача разработки специализированного ВТП, обеспечивающего надежное выявление трещин глубиной от 1 мм в донной части тепловой канавки без удаления из нее слоя окалины. Для решения данной задачи был разработан специализированный преобразователь ВТПУЗ×8, внешний вид которого показан на рисунке 2 и выпущена методика

вихретокового контроля тепловых канавок и галтельных переходов на его основе. ВТПУ3×8 – абсолютный трансформаторный преобразователь, сигнал которого пропорционален глубине трещины. При перемещении ВТПУ3×8 по канавке неизбежны его смещения от стенки к стенке, что приводит к заметному изменению выходного сигнала. Для подавления влияния смещений применяется амплитудно-фазовый метод отстройки, реализуемый дефектоскопом «ЗОНД ВД-96». Наибольшее отношение сигнал/помеха достигается на частоте 32 кГц.

Для настройки дефектоскопа перед контролем разработан стандартный образец ОСП–У3х8–20х20х150–Р–СтНМ (рис. 3), выполняемый из того же материала, что и ротор с контролируемыми тепловыми канавками или из материала, идентичного ему по электромагнитным свойствам. Методика вихретокового контроля тепловых канавок и галтельных переходов роторов паровых турбин ТЭС вихретоковым дефектоскопом «ЗОНД ВД-96» определена выпущенным руководящим документом [1].

Конструктивно вихретоковый преобразователь ВТПУ3×8 состоит из возбуждающей катушки с П-образным ферритовым сердечником и измерительной катушки, размещенной в его межполюсном пространстве. Цель теоретических исследований состояла в определении рационального размещения витков на П-образном сердечнике и получении выходных характеристик ВТП при его взаимодействии с дефектами и влиянии мешающих факторов.

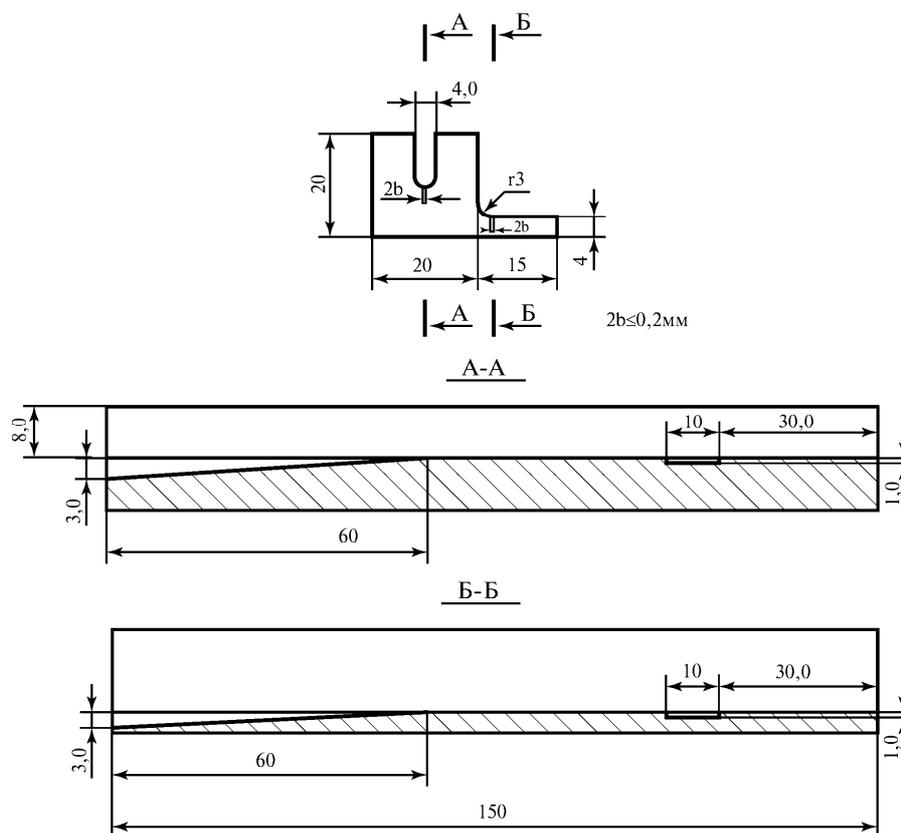


Рисунок 3 – Стандартный образец ОСП–У3х8–20х20х150–Р–СтНМ

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 $\underline{U}_{МС}$, наводимое на бездефектном участке при симметричном расположении ВТП в канавке;
- напряжение $\underline{U}_{МП}$, наводимое на бездефектном участке при прекосе ВТП в канавке;

– напряжение $\underline{U}_{дс}$, наводимое на дефектном участке при симметричном расположении ВТП в канавке;

– напряжение $\underline{U}_{дп}$, наводимое на дефектном участке при перекосе ВТП в канавке.

Исследуемые дефекты имели вид длинной трещины с различным угловым расположением в полукруглом дне канавки, а именно, 0° , 45° и 90° .

Для практики наибольший интерес представляют изменения напряжения \underline{U} , возникающие под влиянием дефекта и под влиянием перекоса ВТП, т.е. при воздействии контролируемого и мешающего параметров.

Соответствующие величины $\Delta\underline{U}_{д} = \underline{U}_{дмс} - \underline{U}_{мс}$ и $\Delta\underline{U}_{п} = \underline{U}_{пм} - \underline{U}_{см}$ нормировались по модулю напряжения холостого хода U_0 , для обобщения получаемых результатов. Результаты расчетов приведены на рисунках 4-7.

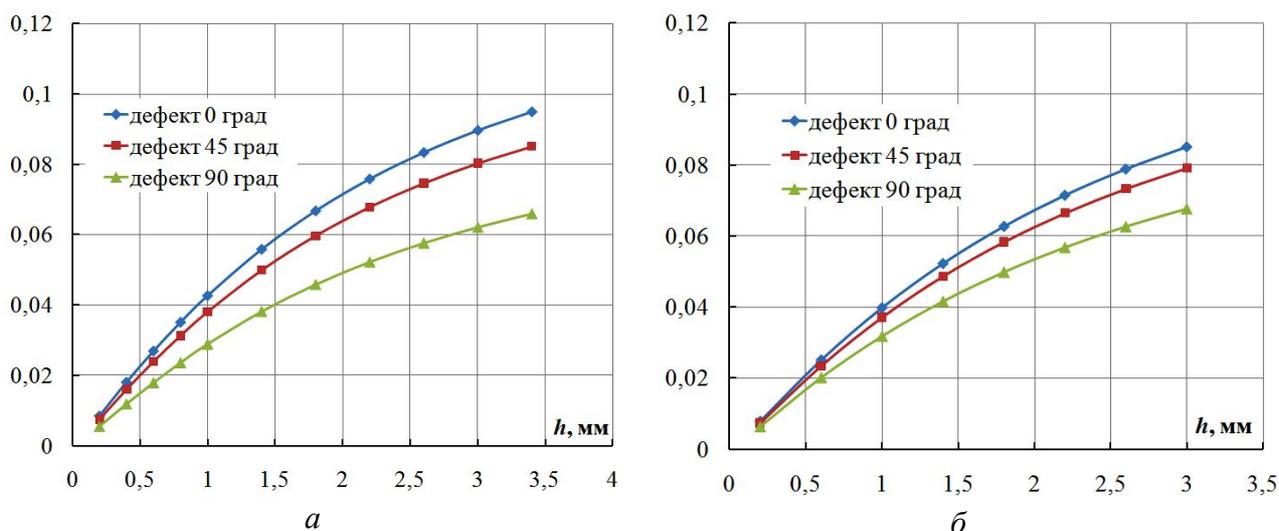


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды приращения относительного напряжения $\Delta\underline{U}_{д}^*$, вносимого дефектами разной глубины h с различным угловым положением φ в дне канавки от их глубины. Витки возбуждающей катушки размещены: а – на боковых стержнях сердечника; б – на верхней перемычке

На рисунке 4 приведены зависимости амплитуды приращения относительного напряжения $\Delta\underline{U}_{д}^*$, вносимого дефектами разной глубины h с различным угловым положением φ в дне канавки от их глубины. Здесь сопоставляются два варианта размещения витков возбуждающей катушки: а – на боковых стержнях сердечника и б – на верхней перемычке. Полученные результаты показывают, что при размещении витков катушки на боковых стержнях величина $\Delta\underline{U}_{д}^*$ возрастает. При этом большая величина приращения, порядка 10 %, имеет место для дефектов, расположенных на нижней части дна канавки ($\varphi = 0$). Следовательно, изменение углового положения φ дефекта при размещении витков возбуждающей обмотки на боковых стержнях сердечника оказывает большее влияние на регистрируемые сигналы ВТП. Приведенные на рисунке 5 годографы приращения относительного напряжения $\Delta\underline{U}_{д}^*$, вносимого дефектами разной глубины h с различным угловым положением φ в дне канавки от их глубины показывают, что фаза вносимого дефектами напряжения постоянна и не зависит от их глубины, а также угловой ориентации при обоих способах размещения витков возбуждающей обмотки.

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.

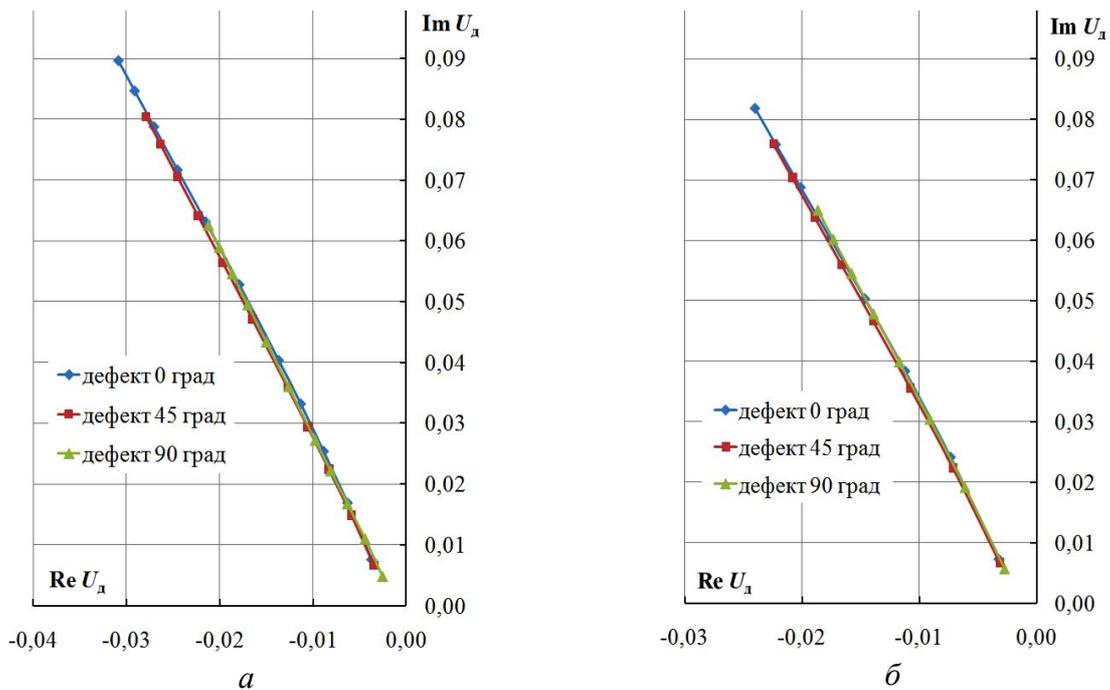


Рисунок 5 – Годографы приращения относительного напряжения ΔU_d^* , вносимого дефектами разной глубины h с различным угловым положением φ в дне канавке от их глубины. Витки возбуждающей катушки размещены: а – на боковых стержнях сердечника; б – на верхней перемычке

Для одновременной отстройки от возможных в процессе контроля изменений рабочего зазора и перекосов необходимо добиться 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°. На рисунке 6 показана комплексная плоскость с векторами $\Delta U_{п1}^*$, $\Delta U_{п2}^*$ и ΔU_d^* . Здесь вектора $\Delta U_{п1}^*$ и ΔU_d^* ортогональны, однако условия коллинеарности $\Delta U_{п1}^*$ и $\Delta U_{п2}^*$, а также ортогональности $\Delta U_{п2}^*$ и ΔU_d^* не выполняются.

Сдвиги фаз соответствующих векторов зависят от частоты и изменяются в соответствии с графиком, приведенным на рисунке 7. Целесообразно выбирать частоту, при которой выполняется условие коллинеарности $\Delta U_{п1}^*$ и $\Delta U_{п2}^*$, что позволяет одновременно отстроиться от обоих мешающих факторов. Проведенные исследования показали, что при изменении электромагнитных свойств металла ротора оптимальная частота также может изменяться. На рисунке 7 приведены зависимости для стали 34ХМА.

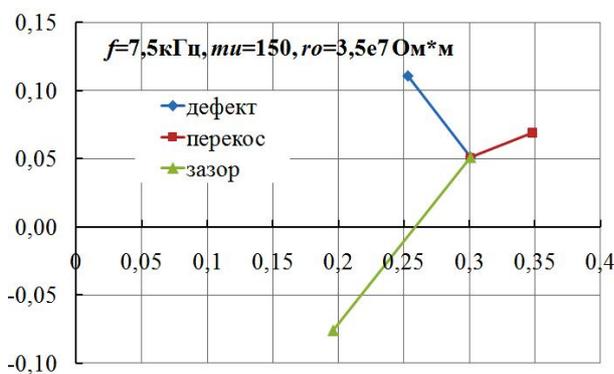


Рисунок 6 – Годографы $\Delta U_{п1}^*$ и ΔU_d^* при воздействии зазора, перекоса и дефекта

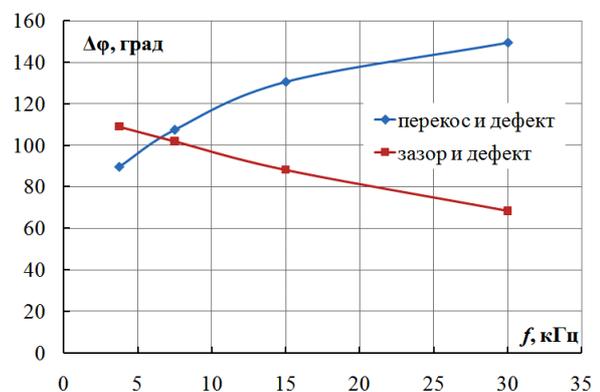


Рисунок 7 – Изменение сдвига фаз между $\Delta U_{п1}^*$ и ΔU_d^* в диапазоне частот

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали, что вариации углового положения дефекта при выбранной конструкции ВТП приводят к погрешности оценки его глубины не более 10 %.
2. При выявлении дефектов целесообразно воспользоваться амплитудно-фазовым методом, так как фазы приращений вносимого напряжения, обусловленные как влиянием дефекта, так и влиянием перекоса, стабильны.
3. Существует оптимальная частота, позволяющая одновременно отстроиться от влияния вариации рабочего зазора и перекоса ВТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 153-34.1-17.454-98. Методические указания по контролю тепловых канавок и галтельных переходов роторов паровых турбин ТЭС вихретоковым дефектоскопом «ЗОНД ВД-96» [Текст]. – Введ. 1999–04–01. – 1998. – 6 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

EDDY CURRENT TESTING 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. RD 153-34.1-17.454-98. Metodicheskie ukazaniya po kontrolyu teplovy'x kanavok i galtel'ny'x perexodov rotorov parovy'x turbin TE'S vixretokovy'm defektoskopom «ZOND VD-96» [Tekst]. – Vved. 1999–04–01. – 1998. – 6 s.

Shkatov Pyotr Nikolaevich

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

Moscow State University of Instrument Making and Computer Science, Moscow
Postgraduate student
E-mail: koloskovdv@bk.ru

С.Ф. КОРНДОРФ, И.Н. НИКУЛИНА

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ЭКЗОКАРПИЕВ ЯГОД

Обоснована необходимость исследования ползучести экзокарпиев ягод. Рассмотрены особенности и приведены результаты контроля ползучести экзокарпиев.

Ключевые слова: ползучесть, экзокарпий, ягоды.

Результаты хранения ягодной продукции обусловлены, в первую очередь, ее лежкостью, т.е. способностью сохраняться длительное время без значительной убыли массы, поражения болезнями, ухудшения товарных качеств и пищевого достоинства. Проявление лежкости в конкретных условиях данного сезона выращивания и хранения называют сохраняемостью продукции. Таким образом, сохраняемость – это количественно-качественное выражение потерь и изменения качества.

В зависимости от лежкости, плоды и овощи делятся на три группы. Ягоды входят в третью группу, то есть характеризуются самой низкой лежкостью. Они имеют тонкие покровные ткани и клеточные стенки. После сбора идет интенсивное дозревание ягод, в ходе которого происходит гидролиз пектиновых веществ за счет роста активности пектолитических ферментов и интенсификации окислительных процессов, при этом цементирующий клетки протопектин гидролизуется. Переход протопектина в пектин обуславливает мягкую консистенцию плода. Применением охлаждения значительно замедляют постепенное свертывание протоплазмы клеток и вытекание клеточного сока [1].

При хранении экзокарпий проявляет свои эластичные свойства, происходит постепенное деформирование ягод. Растяжение экзокарпиев приводит к изменению формы под действием давления внутреннего содержимого, и как следствие, увеличивается площадь контакта ягод друг с другом, а также тары и ягод. Данные процессы сопровождаются возникновением трения экзокарпиев друг об друга и о поверхность тары. Участки экзокарпиев, не имеющие контакта, наиболее подвержены разрыву. Обычно в насыпи, если высота слоя не слишком большая, быстрого разрыва не происходит, а наблюдается явление ползучести – медленной непрерывной пластической деформации под воздействием постоянной нагрузки или механического напряжения. Для обеспечения сохраняемости ягод с точки зрения механической целостности необходимо не превышать такое механическое напряжение, которое требуемый промежуток времени не вызывает разрыва экзокарпия в результате ползучести.

Из-за различия физической природы механизмов, которые приводят к возникновению временных эффектов, единой теории ползучести не существует. Наибольшее развитие получили варианты теории ползучести, описывающие поведение наиболее распространенных материалов: металлов, полимеров, композитов, грунтов и бетона [2]. Ползучесть экзокарпиев растительных плодов, в частности ягод, в настоящее время очень мало изучена.

Для того чтобы проследить динамику развития деформации растяжения экзокарпиев ягод были проведены их испытания на растяжение под действием постоянной нагрузки по прохождению определенных промежутков времени. С этой целью в соответствии с [3] предварительно изготавливались образцы, ширина каждого из которых вычислялась по формуле:

$$h = 0,3c, \quad (1)$$

где c – больший поперечный диаметр ягоды – максимальный диаметр ягоды в плоскости, перпендикулярной плоскости, в которой измеряют длину (высоту) ягоды.

Для сортов, ягоды которых имеют незначительные различия меньшего и большего поперечных диаметров, к числу которых можно отнести и исследуемые в данном эксперименте ягоды черной смородины, допустимо произвольно измерять максимальный диаметр ягоды в плоскости, перпендикулярной плоскости, в которой измеряют высоту и, соответст-

венно, принимать данное значение за s . Таким образом, ширина каждой испытываемой полоски экзокарпия составляла $3 \pm 0,5$ мм.

Каждый образец вертикально закреплялся в зажиме; противоположный конец образца фиксировался в другом зажиме, закрепленном жестко.

Подготовленный образец экзокарпия складывался вдвое таким образом, чтобы его поверхности, ранее непосредственно контактировавшие с мякотью, находились внутри и контактировали друг с другом. В результате этого снижалась вероятность преждевременного разрушения экзокарпия от возможно имеющихся на нем разрывов и трещин.

Также достигалось снижение гидратации поверхностей зажимов, поскольку в данном случае ее причиной было в основном только выдавливание незначительной части влаги изнутри сложенных слоев экзокарпия, а не непосредственное соприкосновение с внутренней поверхностью экзокарпия.

Интенсивное высыхание также значительно уменьшается после сложения испытуемого образца, поскольку влажные и наиболее склонные к высыханию его поверхности, не находятся в непосредственном контакте с воздухом.

После данной подготовки образец подвергался нагружению с постоянным усилием, под воздействием которого он постепенно растягивался. При этом имела место упругая деформация, переходящая в пластическую. При каждом испытании начальное расстояние между зажимами было постоянным ($8 \pm 0,5$ мм), таким образом, растягивались одинаковые по длине части образцов экзокарпия.

Исследования проводились при нагрузках, составляющих от 60 до 100 % условных разрушающих усилий, полученных при проведении опытов на разрыв при растяжении.

При испытаниях экзокарпиев ягод смородины на растяжение на время значения удлинения экзокарпия снимались через 10, 80 и 150 с соответственно.

Данные временные интервалы были выбраны по следующим причинам:

- минимальное время испытаний (10 с) позволяет получить показания в начале процесса растяжения;
- снятие показаний на 80-й секунде испытаний позволяет проследить динамику развития деформации растяжения в ходе установившегося процесса.

Ограничение времени проведения испытаний 150 с обусловлено тем, что при проведении испытаний экзокарпиев ягод смородины на растяжение на разрыв в предварительных опытах средние значения времени растяжения обычно не превосходили 150 с. Оценка точности измерений показана на примере приложения нагрузки $F = 46,9$ г (табл. 1).

Таблица 1 – Пример оценки точности измерений (при $F = 46,9$ г)

№ п/п объекта испытаний		1	2	3	4	5	6	7	8
$H, \text{ мм}$	$t = 10 \text{ с}$	1,21	0,91	0,61	0,91	0,91	0,91	1,21	1,52
	$t = 80 \text{ с}$	1,21	1,21	1,21	0,91	0,91	0,91	0,91	1,21
	$t = 150 \text{ с}$	1,52	1,82	1,82	1,21	1,52	1,82	0,91	1,21
№ п/п объекта испытаний		9	10	11	12	$\Delta \bar{H}$	$S^2(\Delta H)$	$\epsilon, \%$	
$H, \text{ мм}$	$t = 10 \text{ с}$	1,21	0,61	1,21	1,21	1,04	0,0738	12,6	
	$t = 80 \text{ с}$	0,91	1,21	0,91	1,52	1,09	0,0745	26,5	
	$t = 150 \text{ с}$	0,91	1,82	1,52	1,21	1,44	0,1526	44,6	

Поскольку при определении удлинения использовалась одна и та же методика, для подтверждения воспроизводимости результатов достаточно подтвердить гипотезу об однородности дисперсий, полученных при повторных измерениях. При одинаковом количестве повторных измерений однородность оценок дисперсий анализируют по G -критерию Кохрана:

$$G = \frac{S^2(H)_{\max}}{\sum_{i=1}^k S^2(H)_i}, \quad (2)$$

где $S^2(H)_i$ – дисперсия i -ой выборки с выборочным средним \bar{H}_i ; определяется по зависимости

$$S^2(H)_i = \frac{\sum_{j=1}^n (H_{ij} - \bar{H}_i)^2}{n-1}, \quad (3)$$

где k – количество сравниваемых дисперсий;

n – количество повторных измерений в серии;

$S^2(H)_{\max}$ – максимальная дисперсия;

H_{ij} – элементы i -ой выборки.

Нулевая гипотеза о равенстве дисперсий принимается, если полученное значение критерия удовлетворяет условию

$$G < G_{\text{кр}}, \quad (4)$$

где $G_{\text{кр}}$ – критическое значение критерия Кохрана, соответствующее количеству степеней свободы $f = n - 1$, количеству дисперсий k и заданному уровню значимости p .

Для 5 % уровня значимости, $k = 3, f = 12 - 1 = 11, G_{\text{кр}} = 0,5913$.

Для данных из таблицы 1

$$G = \frac{0,1526}{0,3010} = 0,5071, \quad (5)$$

что меньше $G_{\text{кр}}$. Таким образом, гипотеза об однородности дисперсий принимается.

Результаты аналогичных расчетов для исследований при других значениях нагрузки приведены в таблице 2.

Для определения характера изменения относительного удлинения образца во времени согласно [4] на рисунке 1 построены кривые ползучести $\varepsilon = f(t)$ при различных значениях нагрузки.

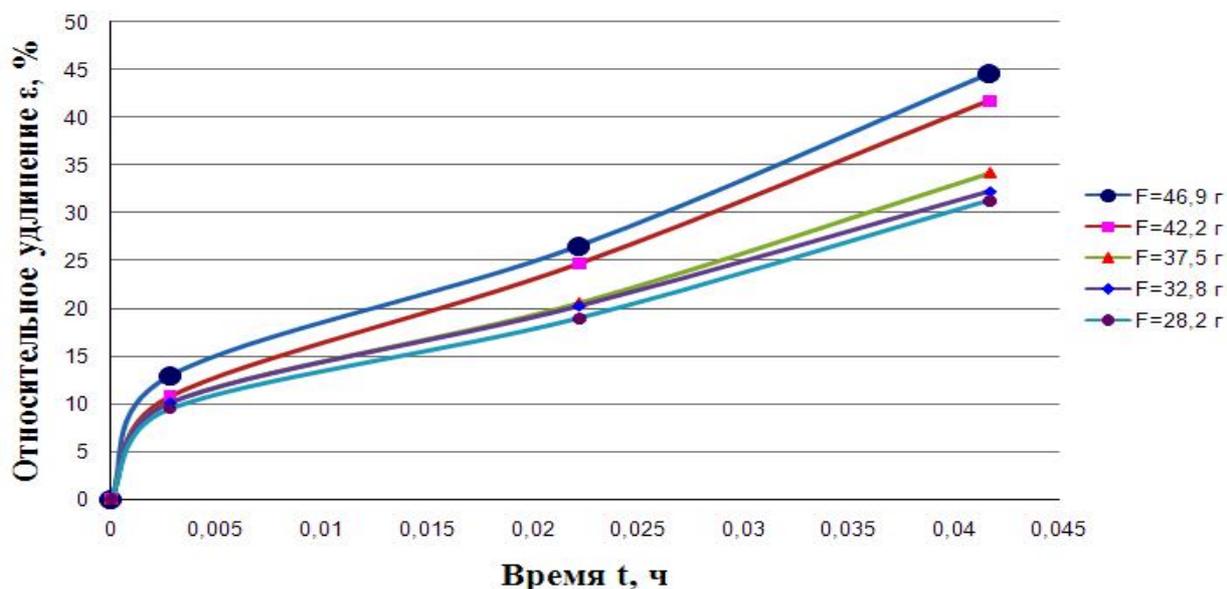


Рисунок 1 – Кривые ползучести $\varepsilon = f(t)$ при различных значениях нагрузки

Таблица 2 – Пример оценки точности измерений (при $F = 28,2 \div 42,2$ г)

№ п/п объекта испытаний	$F = 42,2$ г			$F = 37,5$ г			$F = 32,8$ г			$F = 28,2$ г		
	$t=10$ с	$t=80$ с	$t=150$ с	$t=10$ с	$t=80$ с	$t=150$ с	$t=10$ с	$t=80$ с	$t=150$ с	$t=10$ с	$t=80$ с	$t=150$ с
\bar{H} , мм	0,86	1,11	1,37	0,81	0,84	1,09	0,81	0,81	0,96	0,76	0,76	0,99
$S^2(\Delta H)$	0,1140	0,1726	0,0928	0,1058	0,0511	0,1413	0,0555	0,0382	0,0801	0,0753	0,0245	0,0848
G	0,2445			0,4737			0,4610			0,4593		
ε , %	10,8	24,6	41,7	10,1	20,6	34,2	10,1	20,2	32,3	9,5	18,9	31,3

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что экзокарпий обладает значительной ползучестью, причем она развивается очень быстро, весь период времени до конца испытаний, практически до разрыва скорость удлинения образца остается постоянной. При экспериментах не удалось установить минимальных значений нагрузки, при которых явление ползучести исчезает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров, М.А. Промышленное хранение плодов [Текст] / М.А. Федоров. – М.: Колос, 1981- 184 с.
2. Бойл, Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести [Текст] / Дж. Бойл, Дж. Спенс; пер. с англ. А.С. Кравчук. – М.: Мир, 1986. – 360 с.: ил.
3. Пат. 2337356 Российская Федерация, МПК⁸ G01N33/02. Способ испытания экзокарпиев ягод на растяжение [Текст] / Корндорф С.Ф., Никулина И.Н.; патентообладатель ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет» (ОрелГТУ). – № 2007135374/13; заявл. 24.09.2007; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 30.
4. ОДМ 218.5.006-2010 Рекомендации по методикам испытаний геосинтетических материалов в зависимости от области их применения в дорожной отрасли [Текст]: [Распоряжение Росавтодора (Федерального дорожного агентства) от 16 июля 2010 года № 468-р]. – Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2010. – 71 с.

Корндорф Сергей Фердинандович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
 Тел. (4862) 41-98-76
 E-mail: pms@ostu.ru

Никулина Ирина Николаевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Ведущий инженер управления качества и инновационных технологий в образовании
 Тел. 8-903-882-46-41

S.F. KORNDORF, I.N. NIKULINA

METHODS AND RESULTS OF CONTROL CREEP SKINS BERRIES

The necessity of the study of creep skins of berries. The features and results of creep control skins.

Keywords: *creep, skin, berries.*

BIBLIOGRAPHY

1. Fyodorov, M.A. Promy'shlennoe xranenie plodov [Tekst] / M.A. Fedorov. – M.: Kolos, 1981- 184 s.
2. Bojl, Dzh. Analiz napryazhenij v konstrukciyax pri polzuchesti [Tekst] / Dzh. Bojl, Dzh. Spens; per. s angl. A.S. Kravchuk. – M.: Mir, 1986. – 360 s.: il.

3. Pat. 2337356 Rossijskaya Federaciya, MPK8 G01N33/02. Sposob ispy'taniya e`kzokarpiev yagod na rastyazhenie [Tekst] / Korndorf S.F., Nikulina I.N.; patentoobladatel' GOU VPO "Orlovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (OrelGTU). – № 2007135374/13; zayavl. 24.09.2007; opubl. 27.10.2008, Byul. № 30.

4. ODM 218.5.006-2010 Rekomendacii po metodikam ispy'tanij geosinteticheskix materialov v zavisimosti ot oblasti ix primeneniya v dorozhnoj otrasli [Tekst]: [Rasporyazhenie Rosavtodora (Federal'nogo dorozhnogo agentstva) ot 16 iyulya 2010 goda № 468-r]. – Federal'noe dorozhnoe agentstvo (Rosavtodor), 2010. – 71 s.

Korndorf Sergej Ferdinandovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University – Education-Science-Production Complex", Orel

Doctor of technical science, professor, professor of department "Instrument engineering, metrology and certification"

Tel.: (4862) 41-98-76

E-mail: pms@ostu.ru

Nikulina Irina Nikolaevna

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University – Education-Science-Production Complex", Orel

Lead engineer of quality control and innovative technologies in education

Tel. 8-903-882-46-41

УДК 620.179.1.082.7.05

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, А.К. ПОДМАСТЕРЬЕВ, М.В. ЯКОВЕНКО

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АДГЕЗИИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Рассмотрены подходы к оценке смачиваемости поверхностей жидкими смазочными материалами. Дан анализ стандартизованных методов, установлены основные сложности их практической реализации. Предложены пути решения задачи с применением компьютерной технологии обработки изображения капли тестируемого материала на металлической поверхности.

Ключевые слова: смачиваемость поверхности, краевой угол смачивания, стандартизованные методы определения, компьютерные технологии обработки изображений.

Простейшим способом оценки адгезионных свойств жидких материалов является нанесение капли исследуемого материала на поверхность металла с измерением геометрических характеристик капли (углы смачивания, диаметр и высота капли) [1, 2]. Данный метод также применяется в качестве стандартизованного при оценке маслянистости часовых масел по ГОСТ 7934.2-74 [3].

При реализации методов оценки смачиваемости применяют различное оборудование для измерения краевых углов смачивания. Стандартные методы предполагают применение инструментальных микроскопов и катетометров. Существуют также серийно выпускаемые программно-аппаратные комплексы, основанные на фото- и видеонаблюдении капель исследуемых сред с последующей автоматической или полуавтоматической обработкой. Применение анализа фотоизображений капель допускают и стандартизованные методы. При этом к основным требованиям относят минимально допустимое увеличение изображения (не менее, чем в пять раз), а также максимальную погрешность измерения параметров краевых углов смачивания (например, стандарт на исследования смазывающей способности часовых масел регламентирует погрешность до 12 %).

Следует отметить, что данный подход к определению качества адгезии смазочных материалов на металлических поверхностях не является безупречным, так как обеспечивает оценку смазывающей способности в условиях, отличных от условий фрикционного взаимодействия, тем не менее, является признанным, достоверным и наиболее простым в реализации, что и определяет его выбор для лабораторного определения смачиваемости [4].

Однако, применение этого метода согласно рекомендациям нормативной документации предполагает использование сложного и дорогостоящего универсального либо специализированного оборудования, что затрудняет его реализацию. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование возможности применения для оценки смачиваемости смазочных материалов более простого подхода, основанного на использовании компьютерных технологий.

Сущность исследуемого подхода заключается в нанесении капли масла на поверхность металла, фотографировании капли на поверхности, измерении по фотографии с использованием соответствующих программных средств геометрических размеров капли и в получении значений краевого угла смачивания прямым или косвенным методами.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы пробы смазочных материалов, представленные в таблице 1.

Для эксперимента использовались следующие материалы, реактивы и аппаратура:

- стальная пластина 60×40×10 мм;
- концевая мера длины по ГОСТ 9038-90;
- пробы масел;
- микрошприц МШ-10 М (максимальный дозируемый объем 10 мкл с ценой деления 1 мкл);

- фотоаппарат с 7,1-мегапиксельной матрицей, разрешение фотосъемки 3072×2304;
- штатив для фотоаппарата;
- гексан по ТУ 2631-006-29483781-2008.

Таблица 1 – Описание проб исследуемых смазочных композиций

№ пробы	Тип смазочного материала	Описание типа смазочного материала
1	LUXE ЛЮКС HIT 10W-40 SL/CF	Масло моторное полусинтетическое, класс SAE 10W-40.
2	ZIC A+ 10W-40	ZIC A+ – высококачественное полусинтетическое моторное масло для бензиновых двигателей всех типов. Изготовлено на основе базового масла YUBASE VHVI (высокий индекс вязкости) и сбалансированного пакета присадок.
3	ZIC XQ 5W-40	ZIC XQ – полностью синтетическое моторное масло класса SAE 5W-40 высшего качества для бензиновых и дизельных двигателей. Производится на основе базового масла высочайшего качества и пакетов присадок от Lubrizol, Infinium, Oronite (США) с использованием технологии VHVI.
4	Mobil Super M 10W-40	Моторное масло класса SAE 10W-40 на основе высокоочищенного минерального базового масла с использованием дополнительного загущающего компонента, улучшающего его вязкостно-температурные свойства. Имеет в своем составе эффективный, сбалансированный пакет присадок, обеспечивающих высокие моющие, диспергирующие, противоизносные, противозадирные, антикоррозионные и пр. свойства масла. Индекс вязкости 153.
5	M-8B	Универсальное моторное масло, изготовленное на основе высококачественных базовых масел с добавлением многофункционального пакета присадок. Обладает хорошими смазывающими свойствами при высоких нагрузках. Класс SAE 20W-20.
6	FORD 5W-30 FORMULA F	Моторное масло класса SAE 5W-30. Синтетическое моторное масло с высокими эксплуатационными характеристиками. Рекомендовано для бензиновых и дизельных двигателей Ford.

Оценка проводилась в лабораторном помещении при нормальных климатических условиях:

- температура воздуха 25 °С;
- относительная влажность не более 80 % при 25 °С;
- атмосферное давление 84,0-106,7 кПа (630-800 мм рт. ст.).

Методика эксперимента заключалась в следующем. Поверхность стальной пластины промывалась в гексане и высушивалась. Затем на поверхность пластины наносилось микрошприцем (также предварительно промытом гексаном) как можно ближе к краю необходимое количество капель (в эксперименте 3-4 капли) испытуемого масла (объем смазочного материала в каждой капле – 10 мкл). Рядом с каплями устанавливалась концевая мера длины. Масло выдерживалось на поверхности металла в течение 15 мин, после чего проводилась фотосъемка капель. Для фотосъемки фотоаппарат устанавливался на штатив на такую высоту, чтобы поверхность стальной пластины с каплями и ось объектива оказались в одной плоскости. После фотографирования каждой пробы очистка поверхности повторялась. По описанному алгоритму была проведена фотосъемка всех проб масел.

Пример получаемой для обработки фотографии представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Пример изображения пластины с тремя каплями исследуемого смазочного материала и концевой мерой длины заданного размера

Концевая мера длины устанавливалась в непосредственной близости от капель для измерения их размерных параметров, в частности, диаметра и высоты. Фотографии после цифровой фильтрации шума обрабатывались в программной среде «Компас»: масштабировались с приведением к номинальному размеру концевой меры длины. После масштабирования выполнялись непосредственные измерения параметров капель.

Прямые измерения краевых углов смачивания по каждой из капель для каждой пробы проводились дважды, а именно, измерялись углы Θ_1 и Θ_2 – соответственно, с левой и правой сторон капли. Затем для каждой капли определялось среднее значение $\Theta_{ср. i} = 0,5(\Theta_{1i} + \Theta_{2i})$ и среднее значение для пробы $\Theta_{ср. i} = \sum_1^n (\Theta_{ср. i})$, где n – число капель. Таким образом, для каждой пробы смазочного материала при исследовании трех капель результат измерения краевого угла смачивания представлен средним значением по шести измерениям.

Для оценки достоверности прямых измерений краевого угла дополнительно был реализован косвенный метод «ширины-высоты», который заключается в использовании зависимости:

$$\Theta = \arccos \left[\frac{(0,5D)^2 - h^2}{(0,5D)^2 + h^2} \right],$$

где D – диаметр капли;

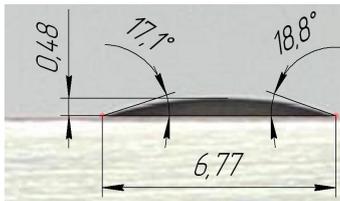
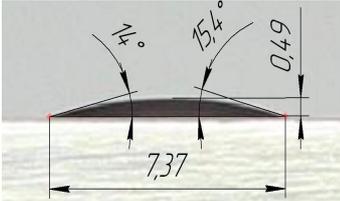
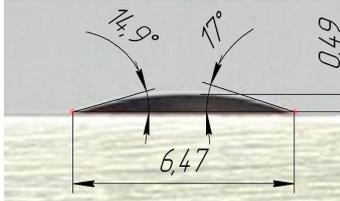
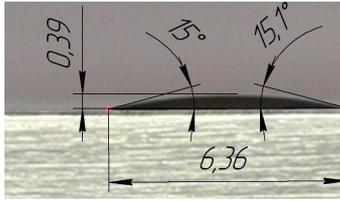
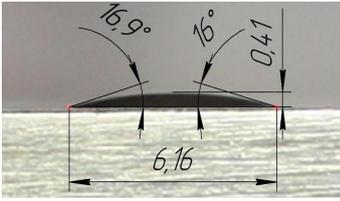
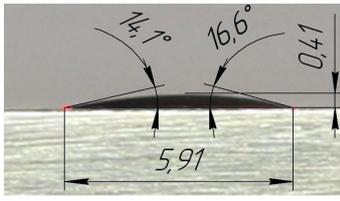
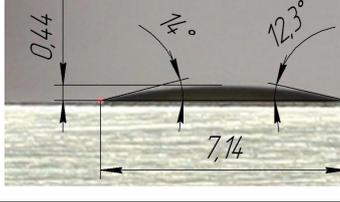
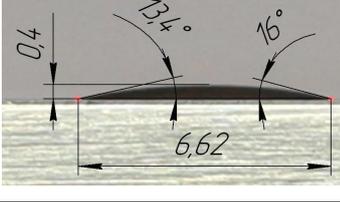
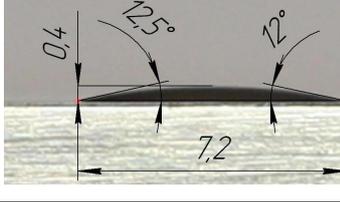
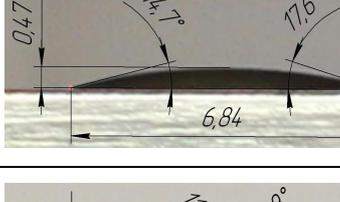
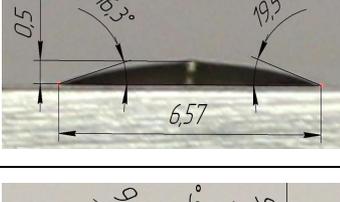
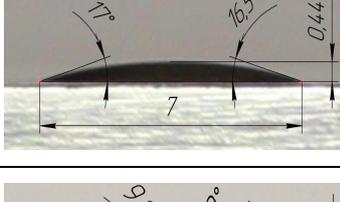
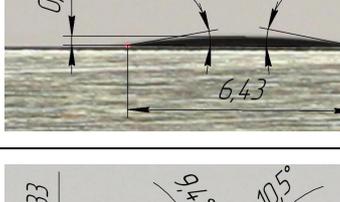
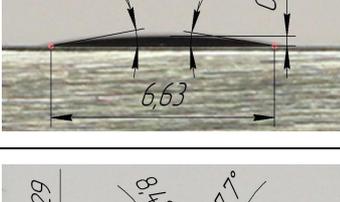
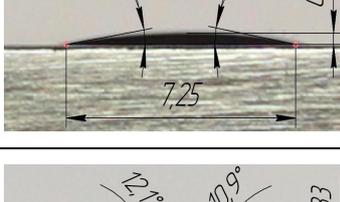
h – высота капли.

Значения параметров D и h определялись непосредственно при обработке изображения в программной среде «Компас» после соответствующего масштабирования. При этом также определялись значения параметров для каждой капли (D_i и h_i) и средние значения параметров для всех капель в каждой пробе ($D_{ср.пр.}$ и $h_{ср.пр.}$).

Расчетным методом из выше приведенного выражения получены значения краевых углов смачивания для каждой капли, средние значения для всех капель пробы, а также средние значения, рассчитанные для средних значений диаметра капли в пробе $D_{ср.пр.}$ и высоты капли в пробе $h_{ср.пр.}$.

В таблице 2 приведены изображения капель со значениями непосредственно определенных для них размерных параметров, а в таблице 3 – числовые значения результатов измерения и расчетов линейных размеров и краевых углов смачивания капель исследуемых проб.

Таблица 2 – Результаты измерений геометрических параметров капель для различных масел

Проба	Капля № 1	Капля № 2	Капля № 3
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Представленные в таблице 3 сравнительные данные по краевым углам свидетельствуют о существенной разности смачиваемости и, следовательно, смазочной способности различных по составу смазочных материалов. При этом анализ усредненных данных показывает, что расхождение в результатах измерений и расчетов не превышает 9 %, что меньше регламентированной погрешности измерения стандартизованным методом в 12 %.

Наилучшей смазочной способностью обладают пробы № 6 и № 5. Проба № 6 является полностью синтетическим моторным маслом, что и объясняет его повышенную адгезионную способность. Проба № 5 (универсальное моторное масло М-8В), на первый взгляд, дала противоречивые результаты, так как в целом это масло несомненно уступает по совокупности свойств остальным видам масел. Хороший результат для данного масла объясняется тем, что оно ориентировано на эксплуатацию в тяжелонагруженных режимах и за счет функциональных присадок обладает именно повышенными смазывающими свойствами. Наихудшими смазывающими свойствами обладает проба № 4 (моторное масло класса SAE 10W-40). Дан-

ное масло получено на основе минерального базового масла с использованием дополнительного загущающего компонента и ориентировано на достижение, прежде всего, высоких вязкостно-температурных свойств.

Таблица 3 – Результаты измерения и расчета диаметров и высот капель, а также краевых углов смачивания для различных смазочных материалов

№ пробы	№ капли	Диаметр капли		Высота капли		Краевой угол						
		капли D_i	средн. $D_{ср.пр.}$	капли h_i	средн. $h_{ср.пр.}$	Прямые измерения				Расчетный метод		
						левый Θ_{1i}	правый Θ_{2i}	сред. для капли $\Theta_{ср.i}$	сред. для пробы $\Theta_{ср.пр.}$	знач. для капли	сред. знач. для пробы	знач. по средн. разм.
1	1	6,77	6,87	0,48	0,499	17,1	18,8	18	16,23	16,14	16,17	16,11
	2	7,37		0,49		14	15,4	14,7		15,15		
	3	6,47		0,49		14,9	17	16		17,23		
2	1	6,36	6,143	0,39	0,4	15	15,1	15,1	15,63	13,98	14,98	14,84
	2	6,16		0,41		16,9	16	16,4		15,16		
	3	5,91		0,41		14,1	16,6	15,4		15,80		
3	1	7,14	7,095	0,44	0,418	14	12,3	13,2	13,48	14,05	13,43	13,42
	2	6,62		0,4		13,4	16	14,7		13,78		
	3	7,2		0,4		12,5	12	12,3		12,68		
	4	7,42		0,43		12,5	14,9	13,7		13,22		
4	1	6,84	6,806	0,47	0,474	14,7	17,6	16,2	16,97	15,65	15,76	15,86
	2	6,57		0,5		16,3	19,5	17,9		17,31		
	3	7		0,44		17	16,5	16,8		14,33		
5	1	6,43	6,771	0,28	0,28	11,2	11,8	11,5	10,3	9,95	9,46	9,46
	2	6,63		0,26		9,9	8,6	9,8		8,97		
	3	7,25		0,3		9,2	10	9,6		9,46		
6	1	7,23	7,503	0,33	0,312	9,4	10,5	10	9,83	10,43	9,71	9,51
	2	8,09		0,29		8,4	7,7	8		8,20		
	3	7,19		0,33		12,1	10,9	11,5		10,49		

Сравнительный анализ результатов исследования проб № 3 и № 2 показывает, что из данных проб масел одного производителя лучшими смазывающими свойствами обладает масло ZIC XQ (полностью синтетическое класса SAE 5W-40), полусинтетическое масло ZIC A+, соответственно, уступает синтетическому не только по вязкостным характеристикам, но и по смазывающей способности. Наконец, масло LUXE ЛЮКС HIT 10W-40 SL/CF, также являясь полусинтетическим, показало близкие результаты с пробой № 2. Таким образом, качественный анализ результатов позволяет сделать вывод об их достоверности. При этом проведенные исследования в целом подтверждают возможность оценки смазочной способности смазочных материалов по краевому углу смачивания, определяемому упрощенным методом с применением фотографирования и компьютерной технологии обработки изображения капли тестируемого материала на металлической поверхности.

Работа выполняется при поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)», код проекта 10423.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матюхин, С.И. Измерение краевого угла смачивания как метод исследования адгезионных свойств поверхности и энергетического состояния молекул на границе раздела двух фаз [Текст] / С.И. Матюхин, К.Ю. Фроленков // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2003, Т. 5. – № 2. – С. 216-220.
2. ГОСТ 745-2003. Фольга алюминиевая для упаковки. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 745-79: введ. 2004-09-01. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 21 с.
3. ГОСТ 7934.2-74. Масла часовые. Метод определения краевого угла смачивания [Текст]. – Введ. 75.07.01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2006. – 2 с.
4. Пахолкин, Е.В. Оценка достоверности результатов исследования смазочной способности материалов электрическими методами [Текст] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 6 (290).

Подмастерьев Константин Валентинович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 41-98-02
E-mail: asms-orel@mail.ru

Подмастерьев Алексей Константинович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Студент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 41-98-76
E-mail: aogiri@mail.ru

Яковенко Михаил Викторович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 41-98-76
E-mail: pms35@ostu.ru

K.V. PODMASTER`EV, A.K. PODMASTER`EV, M.V. YAKOVENKO

ADHESION QUALITY ESTIMATION OF LIQUID LUBRICANT MATERIALS ON METAL SURFACES

Approaches to estimation of surfaces wettability with liquid lubricant materials were considered. Analysis of standard methods was done; common difficulties of their implementation were determined. Problem solution based on digital processing of image with tested material drop on metal surface was proposed.

Keywords: *surface wettability, regional wetting angle, standard estimation methods, digital image processing.*

BIBLIOGRAPHY

1. Matyuxin, S.I. Izmerenie kraevogo ugla smachivaniya kak metod issledovaniya adgezionny'x svoystv po-verxnosti i e'nergeticheskogo sostoyaniya molekul na granice razdela dvux faz [Tekst] / S.I. Matyuxin, K.Yu. Frolenkov // Kondensirovanny'e sredy' i mezhfazny'e granicy'. – 2003, T. 5. – № 2. – S. 216-220.
2. GOST 745-2003. Fol'ga alyuminievaya dlya upakovki. Texnicheskie usloviya [Tekst]. – Vzamen GOST 745-79: vved. 2004-09-01. – Minsk: Mezhhgosudarstvenny'j sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii. – M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2004. – 21 s.
3. GOST 7934.2-74. Masla chasovy'e. Metod opredeleniya kraevogo ugla smachivaniya [Tekst]. – Vved. 75.07.01. – M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2006. – 2 s.

4. Paxolkin, E.V. Ocenka dostovernosti rezul'tatov issledovaniya smazochnoj sposobnosti materialov e'lektricheskimi metodami [Tekst] / E.V. Paxolkin, E.V. Anciforova // Fundamental'ny'e i prikladny'e problemy' tekhniki i tehnologii. – 2011. – № 6 (290).

Podmaster`ev Konstantin Valentinovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Doctor of technical science, professor, head of department “Instrument Making, Metrology and Certification”

Tel. (4862) 41-98-02

E-mail: asms-orel@mail.ru

Podmaster`ev Aleksej Konstantinovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Student of department “Instrument Making, Metrology and Certification”

Tel. (4862) 41-98-76

E-mail: aogiri@mail.ru

Yakovenko Mixail Viktorovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Instrument Making, Metrology and Certification”

Tel. (4862) 41-98-76

E-mail: pms35@ostu.ru

УДК 620.179.1.082.7.05

Е.В. ПАХОЛКИН, Е.В. АНЦИФОРОВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СМАЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований смазочной способности моторных масел электрическим методом. В качестве основного информационного признака использовалась вероятность электрического контактирования деталей трибосопряжения. Установлена связь значений диагностического параметра с результатами оценки адгезионной способности тех же смазочных композиций образцовым стандартизованным методом. Сделаны выводы о достоверности предлагаемого метода, дан анализ достоинств метода.

Ключевые слова: смазывающая способность масел, экспериментальные зависимости, электрические методы трибомониторинга.

ВВЕДЕНИЕ

При граничном трении смазывающая способность смазочного материала (СМ) является определяющим свойством в предотвращении изнашивания поверхностей трения. В работах [1, 2] предложено оценивать смазывающую способность СМ по электрическим параметрам работающего трибосопряжения, так как данный метод обладает следующими достоинствами: простота технической реализации, простота интерпретации результатов измерения, сравнительно низкая стоимость технических средств, оценка смазочной способности непосредственно в условиях фрикционного взаимодействия. Для подтверждения достоверности предлагаемого метода было необходимо провести исследования с применением образцового метода. В публикации [2], исходя из анализа нормативных источников, предлагается в качестве образцового применять способ оценки адгезионных свойств, заключающийся в нанесении капли исследуемого СМ на поверхность металла с измерением геометрических характеристик капли (углы смачивания, диаметр и высота капли). Данный метод применяется в качестве стандартизованного при оценке маслянистости часовых масел (ГОСТ 7934.2-74. Масла часовые. Метод определения краевого угла смачивания).

Таким образом, в данной работе представлены результаты экспериментальных исследований смазочной способности моторных масел по электрическим параметрам с последующим их сравнением с результатами образцового метода.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка смазывающей способности осуществлялась с использованием диагностических параметров электрической группы – среднего электрического сопротивления и нормированного интегрального времени (НИВ) электрического микроконтактирования деталей трибосопряжения [1, 2].

В качестве трибосопряжения использовалась пара трения «вал–неподвижное кольцо», площадь поверхности трения $8,5 \text{ мм}^2$. Нагрузка на трибосопряжение составила 25 Н. Частота вращения вала $f_B = 230 \text{ мин}^{-1}$. Время измерения контролируемых параметров $T_{и} = 1 \text{ с}$.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы пробы следующих СМ:

- 1) LUXE ЛЮКС НIT 10W-40 SL/CF (масло моторное полусинтетическое, класс SAE 10W-40);
- 2) ZIC A+ 10W-40 (полусинтетическое моторное масло для бензиновых двигателей всех типов);
- 3) ZIC XQ 5W-40 (синтетическое моторное масло класса SAE 5W-40 высшего качества для бензиновых и дизельных двигателей);

4) Mobil Super M 10W-40 (масло класса SAE 10W-40 на основе высокоочищенного минерального базового масла с использованием дополнительного загущающего компонента, улучшающего его вязкостно-температурные свойства);

5) M-8B (моторное масло, изготовленное на основе базовых масел с добавлением многофункционального пакета присадок. Обладает хорошими смазывающими свойствами при высоких нагрузках. Класс SAE 20W-20);

6) FORD 5W-30 FORMULA F (синтетическое моторное масло класса SAE 5W-30).

Исследования по каждой пробе предполагали выполнение следующих действий:

– подготовка трибосопряжения (схема трения – «вал–кольцо», размеры вала и кольца выбраны таким образом, чтобы исключить возможность образования гидродинамического слоя);

– промывка трущихся поверхностей, сушка, монтаж на испытательном стенде;

– внесение пробы смазочного материала;

– включение привода и измерение диагностического параметра НИВ в течение от 15 до 19 минут (для различных проб в зависимости от характера изменения измеряемого параметра в процессе приработки трибосопряжения);

– завершение измерения параметра НИВ, измерение параметра «среднее электрическое сопротивление» (без остановки привода).

Результаты измерения параметра НИВ (K) для указанных проб показаны на рисунке 1.

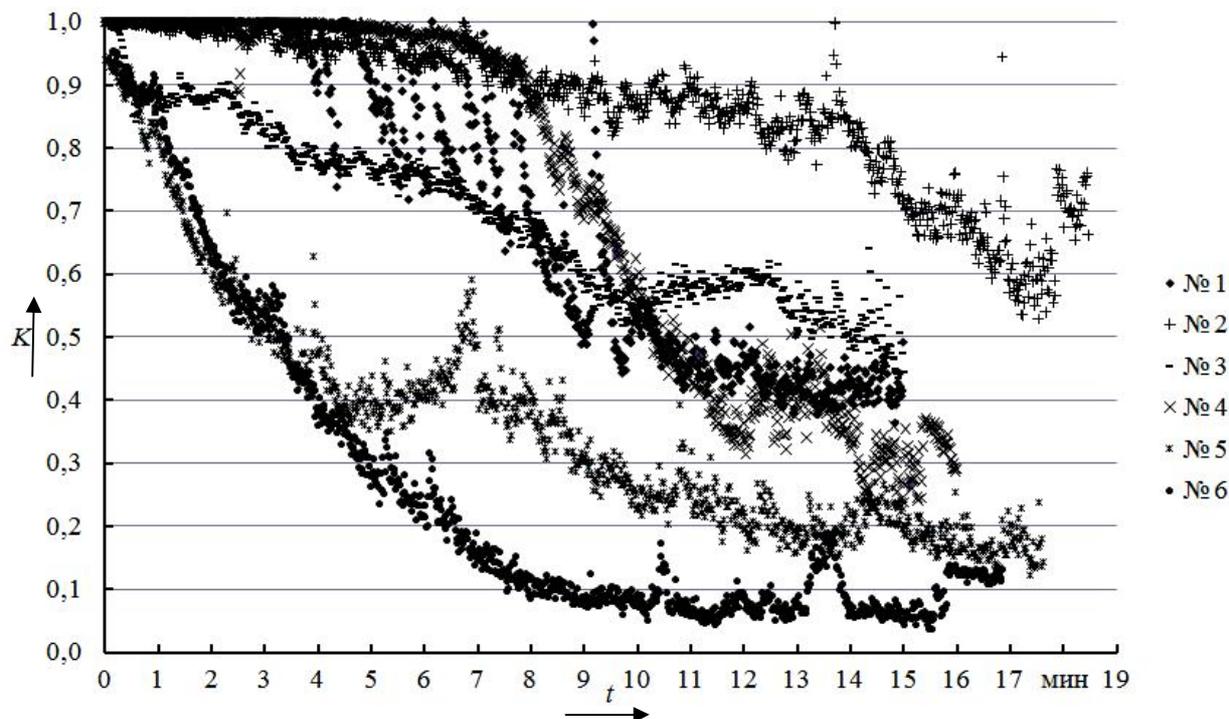


Рисунок 1 – Результаты измерения параметра НИВ для шести проб масел

Общий анализ полученных результатов измерений позволил сделать следующие выводы.

Во-первых, при смазывании испытуемого трибосопряжения пробой № 1 в процессе трения наблюдаются нестационарные процессы, не характерные монотонной приработке. В частности, следует отметить скачкообразные изменения режимов трения после четвертой минуты. После десятой минуты наблюдается стабилизация режима трения, однако в целом данные этого эксперимента следует рассматривать как результаты с невысокой достоверностью.

Аналогичные выводы можно сделать и по четвертой пробе смазочного материала. В частности, следует отметить резкие изменения режима трения между второй и третьей минутой, а также после двенадцатой минуты.

Анализ результатов измерения параметра НИВ для проб № 2, № 3, № 5 и № 6 не дает оснований подвергать сомнению достоверность полученных результатов, исходя из отсутствия явно выраженных резких изменений режимов трения.

Исходя из приведенного анализа, можно сделать заключение, что следует учитывать результаты исследований, полученные на начальной стадии (до четвертой минуты), когда результаты измерения диагностического параметра в большей степени определяются качеством процесса смазки при граничном трении.

Анализ результатов измерения параметра НИВ можно проводить также для конечных этапов исследований по каждой пробе, но при этом следует исключить из рассмотрения пробы № 1 и № 4.

С учетом сказанного, обобщением проведенных экспериментальных исследований следует считать диаграммы, приведенные на рисунке 2 (по оси ординат представлены усредненные значения параметра по шестидесяти точкам). На рисунке 2, а показаны значения диагностического параметра НИВ, измеренные для исследуемых проб на конечных стадиях фрикционного взаимодействия. Эти данные представляют интерес, так как именно для этих стадий проводилось измерение среднего электрического сопротивления, а сопоставление результатов измерения обоих параметров предполагается использовать для анализа адекватности и достоверности полученных результатов.

На рисунке 2, б приведены результаты измерения параметра НИВ на начальной стадии фрикционного взаимодействия, когда числовые значения параметра НИВ в полной мере характеризуют условия смазывания, а не изменение микрогеометрии деталей испытываемого трибосопряжения в процессе фрикционного взаимодействия.

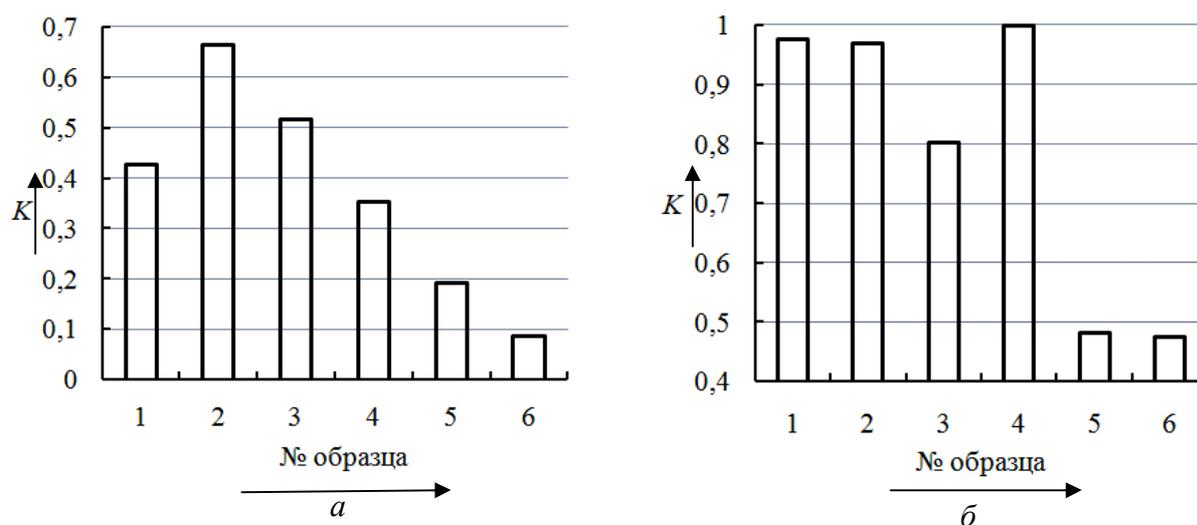


Рисунок 2 – Результаты измерения параметра НИВ для исследуемых проб:
 а – на конечной стадии фрикционного взаимодействия;
 б – на начальной стадии фрикционного взаимодействия (от 3 до 4 минуты)

Характер изменения диагностического параметра НИВ для интервалов времени начальных стадий фрикционного взаимодействия показан на рисунке 3. Анализ характера изменения диагностического параметра позволяет констатировать отсутствие явно выраженных монотонных трендов, связанных с приработкой трибосопряжения, в течение рассматриваемого интервала времени.

Для проверки адекватности полученных результатов измерения основного параметра НИВ выполнены измерения среднего сопротивления (R). Сопротивление измерялось для каждой пробы (после завершения измерения НИВ) в течение 5 с, частота дискретизации составляла 10 кГц. При обработке результатов выполнено усреднение результатов за 1 с. Результаты измерений для каждой пробы показаны на рисунке 4. Сводная диаграмма результатов измерения среднего сопротивления показана на рисунке 5.

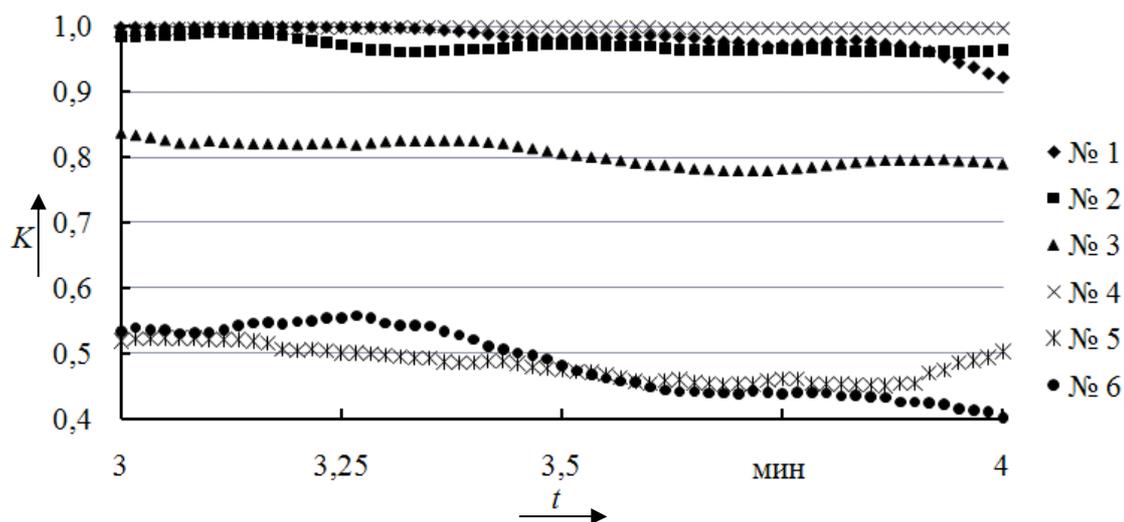


Рисунок 3 – Характер изменения параметра НИВ для исследуемых проб на начальной стадии фрикционного взаимодействия (от 3 до 4 минуты)

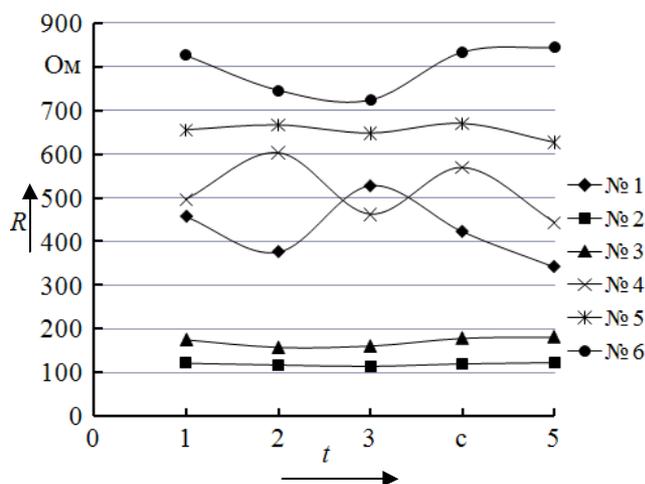


Рисунок 4 – Характер изменения сопротивления трибосопряжения при смазывании различными пробами

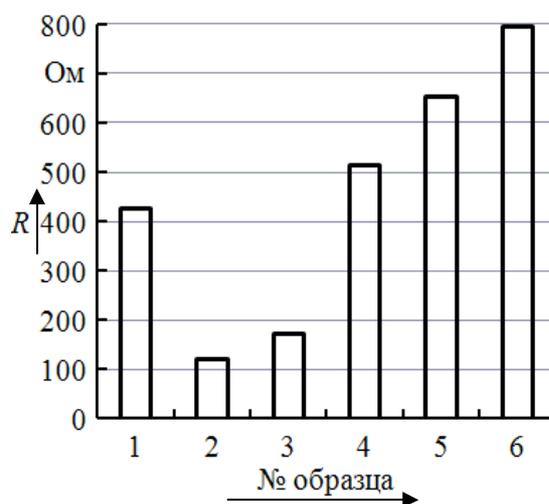


Рисунок 5 – Результаты измерения сопротивления трибосопряжения при смазывании исследуемыми пробами

Качественный анализ рисунков 5 и 2, а позволяет сделать вывод о достоверности результатов измерения НИВ и сопротивления, так как наблюдается строго противоположный характер результатов по различным пробам, а именно, убыванию числовых значений параметра НИВ соответствует возрастание значений электрического сопротивления для соответствующих проб исследуемых материалов.

Окончательная проверка достоверности результатов может быть получена при сравнении полученных данных с данными образцового метода. Как уже говорилось выше, исходя из анализа нормативных источников [2], в качестве образцового решено применять метод исследования краевых углов смачивания.

В таблице 1 приведены результаты измерения краевых углов капель исследуемых проб (были реализованы два метода – метод непосредственной оценки и метод «ширины – высоты», основанный на измерении диаметра капли и ее высоты). Для каждой пробы измерения проводились по трем каплям, измерялись углы Θ_1 и Θ_2 – соответственно, с левой и правой стороны каждой капли. После измерения данных углов определялся средний угол. Таким образом, для каждой пробы СМ результат измерения краевого угла представлен средним значением по шести измерениям. На рисунке 6 представлены результаты измерения краевых углов (Θ) в виде диаграммы.

Таблица 1 – Результаты измерения краевых углов и реализации метода «ширины – высоты»

Номер пробы		1	2	3	4	5	6
Значение краевого угла, град.	прямые измерения	16,23	15,63	13,48	16,97	10,3	9,83
	расчетный метод	16,11	14,84	13,42	15,86	9,46	9,51

Доказательством достоверности разработанного метода оценки смазывающей способности материалов по признаку «вероятность электрического контактирования» с применением параметра НИВ может являться установление связей между результатами предлагаемого метода и образцового метода.

Качественный анализ рисунков 2, а, 5 и 6 позволяет констатировать следующее:

- между значениями краевых углов капель СМ и параметром НИВ наблюдается монотонно возрастающая зависимость;
- между значениями краевых углов капель СМ и сопротивлением наблюдается монотонно убывающая зависимость.

На рисунке 7 показаны результаты регрессионного анализа по установлению функциональной зависимости между краевым углом капли СМ и значением параметра НИВ.

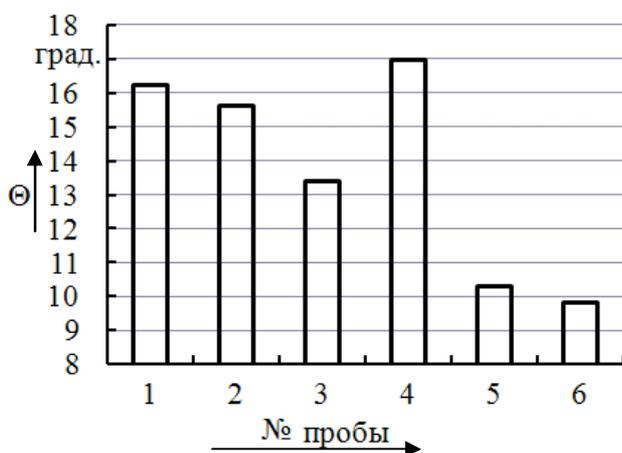


Рисунок 6 – Результаты измерения краевых углов смачивания

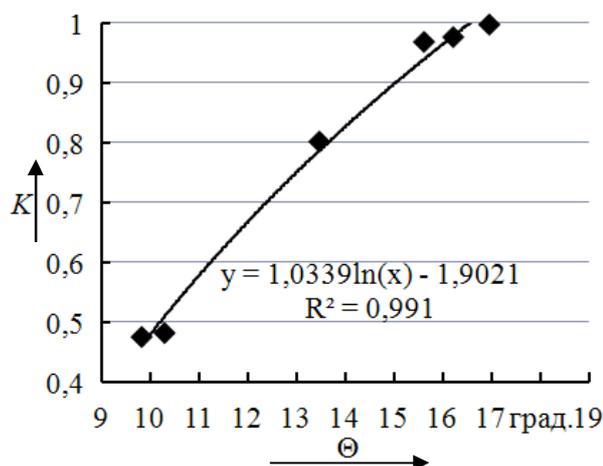


Рисунок 7 – Зависимость между краевым углом капли СМ и значением параметра НИВ

Приведенные на рисунке 7 точки получены в результате усреднения по 60 отсчетам параметра НИВ (ордината) и по усреднению шести результатов измерения краевого угла (абсцисса). Приведенные данные соответствуют начальной стадии фрикционного взаимодействия (от 3 до 4 мин). Результаты регрессионного анализа получены с помощью программы Microsoft Excel, уровень достоверности регрессионной зависимости оценивается показателем $R^2 = 0,991$, что говорит о значимости установленной связи.

На рисунке 8, а показаны результаты регрессионного анализа по установлению функциональной зависимости между краевым углом капли СМ и значением параметра НИВ на конечной стадии фрикционного взаимодействия. В данном случае к рассмотрению были приняты пробы № 2, № 3, № 5 и № 6 по причинам, указанным выше.

Данные на рисунке 8, а показывают, что при том же уровне достоверности ($R^2 = 0,9923$) вид функциональной зависимости принципиально не изменился.

На рисунке 8, б показаны результаты регрессионного анализа по установлению функциональной зависимости между краевым углом капли СМ и значением параметра «среднее электрическое сопротивление».

Достоверность функциональной зависимости оценивается параметром $R^2 = 0,985$, каждая точка получена по результатам усреднения десяти тысячи отсчетов по сопротивлению (ордината) и шести результатов измерения краевого угла (абсцисса).

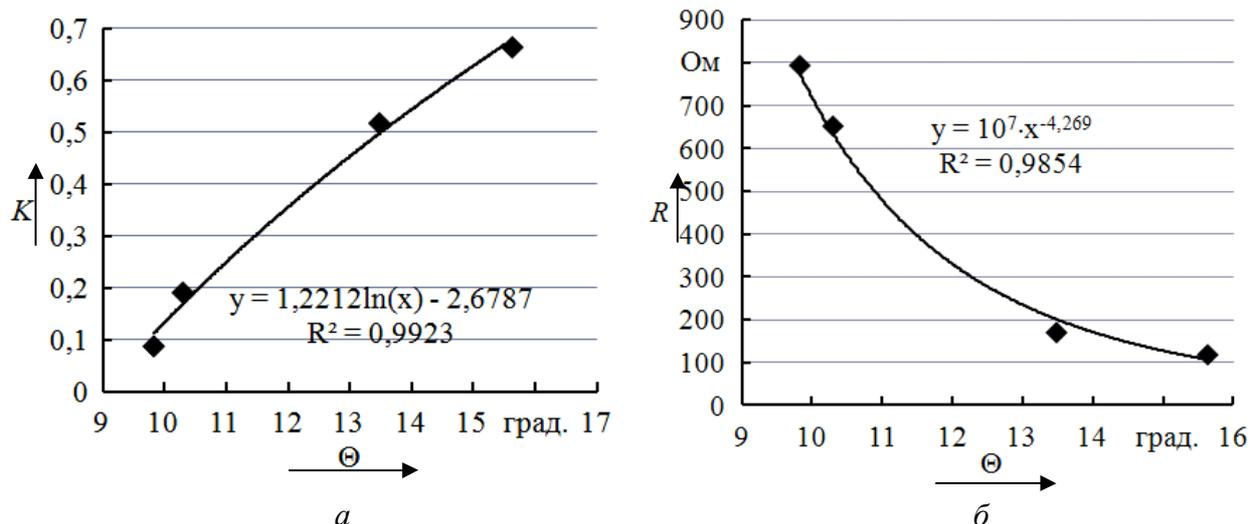


Рисунок 8 – Зависимости между краевым углом капли СМ и значениями электрических параметров: а – НИБ; б – «среднее электрическое сопротивление»

Представленные рисунками 7-8 результаты позволяют сделать вывод, что гипотеза о связи вероятности контактирования в трибосопряжении при граничной смазке со смазывающей способностью смазочных материалов подтверждена, при этом указанная связь может быть описана функциональной зависимостью.

Работа выполняется при поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)», код проекта 10423.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахолкин, Е.В. Экспериментальные исследования смазывающей способности моторных масел электрическим методом [Текст] / Е.В. Пахолкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 5 (283). – С. 125-128.
2. Пахолкин, Е.В. Оценка достоверности результатов исследования смазочной способности материалов электрическими методами [Текст] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 6 (290).

Пахолкин Евгений Васильевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
 Тел. (4862) 41-66-84
 E-mail: eugene_p@bk.ru

Анцифорова Елена Владимировна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
 Тел. (4862) 41-98-76
 E-mail: ele-anciforova@yandex.ru

E.V. PAXOLKIN, E.V. ANCIFOROVA

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF LUBRICATING ABILITY OF ENGINE OILS BY ELECTRIC METHODS

The article contains results of experimental researches of lubricating ability of engine oils by electric methods. The probability of an electrical contact of details of friction units was used in the capacity of the main information parameter. The connection was found between values of the diagnostic parameter and results of evaluation of adhesive ability of the same lubricant compositions by exemplary standardized method. Conclusions about the validity of the proposed method were done. An analysis of the merits of the method was done.

Keywords: *lubricating ability of engine oils, experimental dependences, electric methods of tribomonitoring.*

BIBLIOGRAPHY

1. Paxolkin, E.V. E'ksperimental'ny'e issledovaniya smazy'vayushhej sposobnosti motorny'x masel e'lektricheskim metodom [Tekst] / E.V. Paxolkin // Fundamental'ny'e i prikladny'e problemy' tekhniki i texnologii. – 2010. – № 5 (283). – S. 125-128.

2. Paxolkin, E.V. Ocenka dostovernosti rezul'tatov issledovaniya smazochnoj sposobnosti materialov e'lektrichesкими metodami [Tekst] / E.V. Paxolkin, E.V. Anciforova // Fundamental'ny'e i prikladny'e problemy' tekhniki i texnologii. – 2011. – № 6 (290).

Paxolkin Evgenij Vasil'evich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Instrument Making, Metrology and Certification”

Tel. (4862) 41-66-84

E-mail: eugene_p@bk.ru

Anciforova Elena Vladimirovna

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “State University – Education-Science-Production Complex”, Orel

Postgraduate student of department “Instrument Making, Metrology and Certification”

Tel. (4862) 41-98-76

E-mail: ele-anciforova@yandex.ru

А.В. КОРОБКО, Е.Г. АБАШИН

КОНТРОЛЬ НАЧАЛЬНОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ БЕТОНА В НЕНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ ВИБРАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

В статье предлагается вибрационный способ контроля начального модуля упругости бетона в ненапряженных железобетонных балках по результатам измерения основной (или первой резонансной) частоты поперечных или продольных колебаний. Апробация предложенного способа на железобетонных балках с переменной величиной начального модуля упругости показала, что эти динамические параметры функционально связаны с модулем упругости бетона.

Ключевые слова: железобетонная балка, модуль упругости бетона, вибрационные испытания, продольные колебания, поперечные колебания, основная частота колебаний.

Железобетонные конструкции являются наиболее распространенными в современном строительстве, поэтому проблема разработки новых неразрушающих методов их диагностики в процессе эксплуатации и контроля качества при их изготовлении является весьма актуальной. В настоящее время в нашей стране все шире ведутся работы по реконструкции зданий и сооружений с целью их приспособления под новые технологические нужды. При проведении обследования таких зданий и сооружений зачастую отсутствует какая-либо информация о физико-механических свойствах использованного бетона в железобетонных конструкциях, их армировании и другие сведения, необходимые для проверки прочности, жесткости и трещиностойкости конструкций под новые технологические нагрузки.

Среди неразрушающих методов диагностики и контроля качества строительных конструкций особое место занимают вибрационные методы, поскольку они менее трудоемки. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, проводимые научными коллективами под руководством Э.А. Сехниашвили [1] и В.И. Коробко [2], показали, что вибрационные методы позволяют определять интегральные характеристики железобетонных балок (жесткость, трещиностойкость и прочность) по результатам анализа их динамических параметров (основная или первая резонансная частота колебаний, логарифмический декремент затуханий колебаний). Однако в нашей стране эти методы контроля качества не получили должного распространения и не применялись вообще для определения начального модуля упругости в железобетонных конструкциях.

В основу экспериментальных методов диагностики и контроля качества конструкций балочного типа с использованием вибрационных технологий положена фундаментальная закономерность, установленная профессором В.И. Коробко [2], согласно которой произведение максимального прогиба упругой однопролетной балки постоянного сечения с произвольными граничными условиями w_0 , нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q , на квадрат ее основной (или первой резонансной) частоты поперечных колебаний $\omega_{\text{поп}}$ с точностью до размерного коэффициента q/m (где q – интенсивность нагрузки, m – погонная масса балки) есть величина постоянная, равная $\approx 4/\pi$:

$$w_{\text{поп}} \omega^2 \approx 4/\pi \cdot q/m. \quad (1)$$

В статье [3] теоретически показана возможность определения модуля упругости бетона E_b в железобетонных балках по основной частоте их свободных поперечных $\omega_{\text{поп}}$ или продольных $\omega_{\text{пр}}$ колебаний:

$$E_b = \frac{l^4 \omega_{\text{поп}}^2 m}{83,12(I_b + \alpha_s A_s y_s^2)}; \quad E_b = \frac{\omega_{\text{пр}}^2 l^2 m}{\pi^2 A_{\text{red}}}, \quad (2)$$

где m – погонная масса балки, а остальные обозначения являются общепринятыми в теории железобетонных конструкций.

Для экспериментальной проверки зависимостей (2) были изготовлены 5 типов железобетонных перемычек (по две одинаковых, всего 10 штук) со следующими геометрическими характеристиками и физическими параметрами: $l = 2590$ мм, $b = 120$ мм, $h = 140$ мм; $m \approx 109$ кг; арматура класса А-III диаметром $d_s = 12$ мм; бетон классов В7,5; В15; В20; В22,5; В30 по прочности. Испытания проводились на стенде, схема которого приведена на рисунке 1.

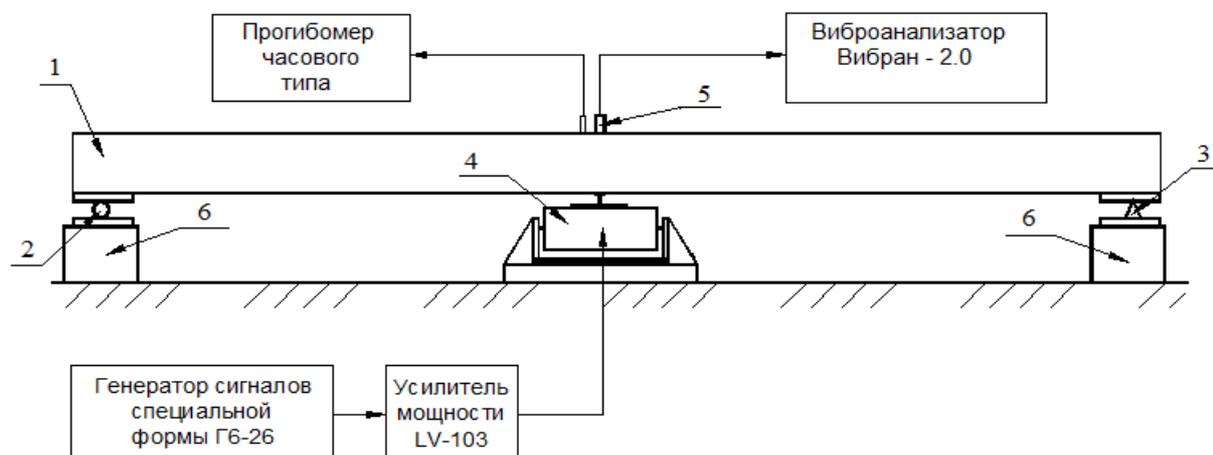


Рисунок 1 – Функциональная схема испытательного стенда при использовании поперечных колебаний:
 1 – контролируемая балка; 2, 3 – подвижная и неподвижная шарнирные опоры;
 4 – ударное устройство – возбудитель собственных поперечных колебаний;
 5 – виброанализатор спектра колебаний «Вибран-2»; 6 – силовые опоры

В балке 1, установленной на стенде и закрепленной на опорах 2 и 3, с помощью ударного устройства 4 возбуждались поперечные механические колебания, спектральный анализ которых осуществлялся с помощью виброанализатора «Вибран – 2.0» 5 и определялась основная частота колебаний. В каждой балке колебания возбуждались не менее 10 раз с различной силой удара и небольшим смещением ударного устройства относительно центра балки. После статистической обработки результатов измерений был проведен графический анализ полученных экспериментальных зависимостей (рис. 2 и 3).

Функциональная схема испытательного стенда при использовании продольных колебаний аналогична схеме, представленной на рисунке 1. Разница заключалась в том, что возбуждение колебаний и прием сигнала осуществлялись на первой резонансной частоте с торца балки с использованием вибровозбудителя и приемника колебаний.

Результаты испытаний балок приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты измерения основной частоты поперечных колебаний балок и их отклонения от частоты, полученной из первой формулы выражений (2)

Класс бетона	В 7,5	В 15	В 20	В 22,5	В 30
$\omega_{\text{поп(эксп)}}, \text{с}^{-1}$	161	182	188	192	184
$\omega_{\text{поп(теор)}}, \text{с}^{-1}$	154	185	200	206	220
Отклонение, %	4,55	1,62	6,00	6,80	16,36

Таблица 2 – Результаты измерения резонансной частоты продольных колебаний балок и их отклонения от частоты, полученной из второй формулы выражений (2)

Класс бетона	В 7,5	В 15	В 20	В 22,5	В 30
$\omega_{\text{пр(эксп)}}, \text{с}^{-1}$	3121	3705	4296	4390	4616
$\omega_{\text{пр(теор)}}, \text{с}^{-1}$	3159	3787	4101	4214	4496
Отклонение, %	1,2	2,17	4,75	4,18	2,67

Анализ табличных данных показывает: с ростом класса бетона (модуля упругости) при возбуждении поперечных колебаний отклонения экспериментальных данных от теоретических достигает более 16 %; (рис. 2) при использовании продольных колебаний эти отклонения не превышают 5 % (рис. 3).

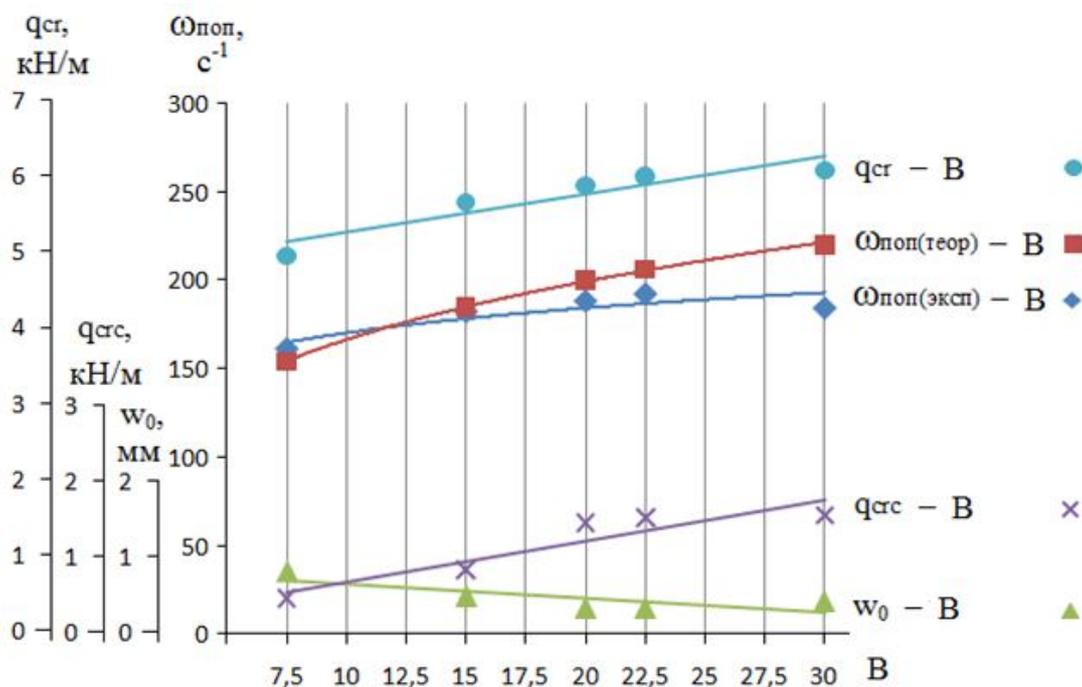


Рисунок 2 – Графические зависимости контролируемых параметров железобетонных балок от их основной частоты поперечных колебаний

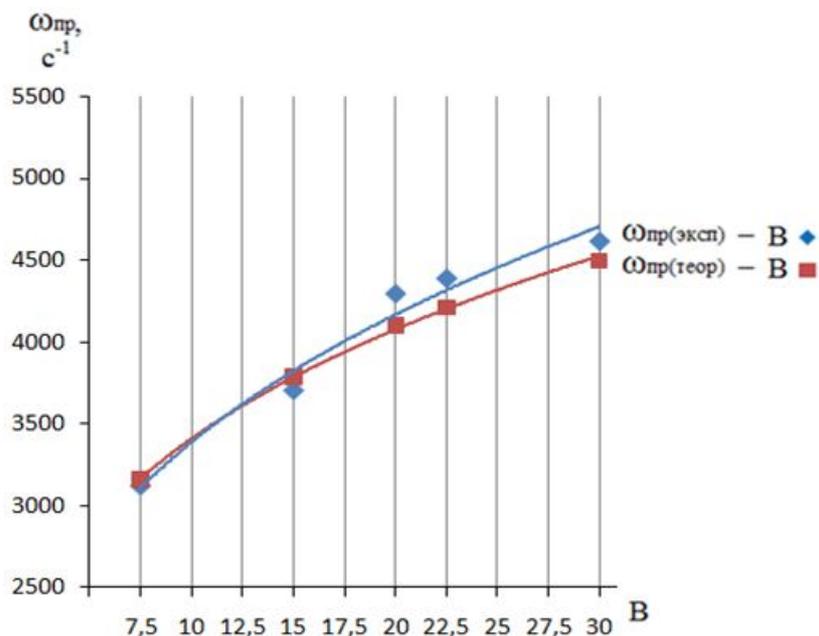


Рисунок 3 – Графики зависимостей $\omega_{pr(теор)} - B$ и $\omega_{pr(эксп)} - B$

Над всеми балками, изготовленными для эксперимента, помимо динамических испытаний был также проведен полный комплекс статических испытаний ступенчато возрастающей равномерно распределенной нагрузкой с контролем их жесткости w_0 , трещиностойкости $q_{crс}$ и прочности q_{cr} . На рисунке 2 представлены графики зависимостей $w_0 - B$, $\omega_{pop} - B$,

$q_{cr} - B$, $q_{crc} - B$. Кривая $\omega_{\text{поп(теор)}} - B$ построена по формуле (2); кривая $\omega_{\text{поп(эксп)}} - B$ является функцией, аппроксимирующей экспериментальные результаты. На рисунке 2 вертикальный масштаб у рассматриваемых функций разный; это сделано для удобства графического представления результатов эксперимента.

На рисунке 3 представлены графики зависимостей $\omega_{\text{пр}} - B$: кривая $\omega_{\text{пр(теор)}} - B$ построена по формуле (2); кривая $\omega_{\text{пр(эксп)}} - B$ является функцией, аппроксимирующей экспериментальные результаты.

Анализ графиков, изображенных на рисунках 2 и 3, показывает:

- эксперименты убедительно подтвердили наличие функциональной связи между модулем упругости бетона и основной частотой поперечных и продольных колебаний балки (и качественные и количественные оценки, полученные теоретическим и экспериментальным путем весьма высокие);
- лучшее совпадение теоретических и экспериментальных значений частот удалось добиться при использовании продольных колебаний;
- экспериментальные зависимости, полученные по результатам статических испытаний, близки к линейным.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные эксперименты подтвердили наличие функциональной связи между модулем упругости бетона в железобетонных ненапряженных балках с их основной (или первой резонансной) частотой продольных и поперечных колебаний в ненагруженном состоянии. Эти зависимости можно использовать в качестве математических моделей при разработке вибрационного способа диагностики железобетонных балок, находящихся в условиях эксплуатации.

2. Выявлены функциональные зависимости между параметрами жесткости, трещиностойкости и прочности железобетонных балок и модулем упругости бетона, которые являются практически линейными. Эти зависимости приводят к идее разработки теоретического аппарата для приближенного определения жесткости, трещиностойкости и прочности железобетонных балок по модулю упругости бетона при одинаковых условиях армирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сехниашвили, Э.А. Интегральная оценка качества и надежности предварительно напряженных конструкций [Текст] / Э.А. Сехниашвили. – М.: Наука, 1988. – 216 с.
2. Коробко, В.И. Контроль качества строительных конструкций: Виброакустические технологии [Текст] / В.И. Коробко, А.В. Коробко – М.: Издательство АСВ, 2003. – 288 с.
3. Коробко, В.И. Способы определения площади поперечного сечения продольной арматуры и модуля упругости бетона в железобетонных балках по результатам статических и динамических испытаний [Текст] / В.И. Коробко, Е.Г. Абашин // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство и реконструкция». Орел ГТУ. – 2010. – № 2/28. – С. 23-25.

Коробко Андрей Викторович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика»

Тел. (4862) 41-98-46

E-mail: center_epb@mail.ru

Абашин Евгений Геннадьевич

Центр экспертизы промышленной безопасности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел

Инженер

Тел.: (4862) 76-03-72

E-mail: oantc@ostu.ru

A.V. KOROBKO, E.G. ABASHIN

CONTROL OF CONCRETE ELASTICITY MODULE IN REINFORCED CONCRETE BEAMS BY THE VIBRATION METHOD

The article examines the vibration method for control of concrete elasticity module reinforced concrete beams by the main frequency lateral and longitudinal oscillations. By the investigations results of reinforced concrete beams with different concrete elasticity module is proved that the main frequency lateral and longitudinal oscillations is connected with the concrete elasticity module.

Keywords: reinforced concrete beams, concrete elasticity module, vibration tests, longitudinal oscillation, lateral oscillation, the main frequency of vibrations.

BIBLIOGRAPHY

1. Sexniashvili, E.A. Integral'naya ocenka kachestva i nadyozhnosti predvaritel'no napryazhyonny'x konstrukcij [Tekst] / E.A. Sexniashvili. – M.: Nauka, 1988. – 216 s.
2. Korobko, V.I. Kontrol' kachestva stroitel'ny'x konstrukcij: Vibroakusticheskie texnologii [Tekst] / V.I. Korobko, A.V. Korobko – M.: Izdatel'stvo ASV, 2003. – 288 s.
3. Korobko, V.I. Sposoby' opredeleniya ploshhadi poperechnogo secheniya prodol'noj armatury' i modulya uprugosti betona v zhelezobetonny'x balkax po rezul'tatam staticheskix i dinamicheskix ispy'tanij [Tekst] / V.I. Korobko, E.G. Abashin // Izvestiya OrelGTU. Seriya "Stroitel'stvo i rekonstrukciya". Orel GTU. – 2010. – № 2/28. – S. 23-25.

Korobko Andrej Viktorovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University – Education-Science-Production Complex", Orel

Doctor of technical science, professor of department "Theoretical and Applied Mechanics"

Tel. +7 (4862) 41-98-46

E-mail: center_epb@mail.ru

Abashin Evgenij Gennad'evich

Center of Industrial Safety of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University – Education-Science-Production Complex", Orel

Engineer

Tel. (4862) 76-03-72

E-mail: oantc@ostu.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 иверху – 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 языках.
- 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, фотографии) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравнивают 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.

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

Технический редактор Егорова А.И.
Компьютерная верстка Егорова А.И.

Подписано в печать 14.11.2011 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 10,4.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.