

Редакционный совет

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф., председатель
Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф., зам. председателя
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.
Вловин С.И. д-р техн. наук, проф.
Дмитриев А.М. д-р техн. наук, проф., член-кор. 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.
Малнин 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,
55-05-81

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, 2014

Содержание

Естественные науки

<i>Ромашин С.Н., Хорошилова М.В., Шоркин В.С., Сами Аль Шатеби</i> Зависимость энергии адгезии графеновой пленки от ее толщины.....	3
<i>Головешкин В.А., Калугин И.А., Козырев Ю.М., Пономарев А.В., Яблочко С.В.</i> Оценка осевой деформации вала при нанесении покрытия из порошкового материала.....	12
<i>Гасанов Ф.Ф.</i> Периодическая задача о зарождении трещины в волокне линейно армированных композитов при продольном сдвиге.....	18
<i>Зульфугаров Э.И.</i> Моделирование зарождения искривленной трещины в тормозном барабане автомобиля.....	24

Моделирование технологических процессов

<i>Галатов К.С.</i> Регрессионная модель процесса прокатки стержня куриного пера рифленным валком на плоской поверхности.....	31
<i>Плахотникова Е.В., Протасев В.Б.</i> Повышение качества электродинамических систем «электропривод – запорная арматура» путем обеспечения согласованности и функциональной совместимости их элементов.....	37
<i>Скворцов В.Н., Пучков В.Н., Албагачиев А.Ю.</i> Оценка упругопластических свойств фрикционного контакта при трении углеродных фрикционных композиционных материалов.....	45

Конструирование, расчеты, материалы

<i>Овчинников Е.В., Чекан Н.М., Акула И.П.</i> Триботехнические характеристики плазмохимических покрытий AlTiN.....	55
<i>Фёдоров Т.В.</i> Аппроксимация экспериментальных кривых упрочнения неоднородными дробно-рациональными B-Сплайнами.....	64

Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Канатников Н.В., Тарапанов А.С.</i> Производственные испытания зубострогальных резцов с дифференциальными схемами резания.....	69
<i>Комаров В.А., Плешаков В.В., Сапронов А.А.</i> Повышение эффективности фрезерования закаленных стальных деталей.....	76
<i>Сломинская Е.Н., Лосев А.В., Фадеев А.В.</i> Технологическая система для обеспечения промышленной чистоты прецизионных деталей.....	80

Машины, аппараты, технологии пищевой и легкой промышленности

<i>Моськина Е.Л., Проколова Е.В., Моськин А.А., Дюжиков Н.В.</i> Технологические особенности раскроя текстильных полотен с содержанием полиуретановых волокон.....	89
--	----

Инновации и кадры в машиностроении

<i>Степанова Е.Ю.</i> Проблемы подготовки инженерно-технических кадров для интегрированных структур оборонно-промышленного комплекса.....	94
---	----

Приборостроение и биотехнические системы

<i>Шалобаев Е.В., Дунаев А.В., Козырева О.Д.</i> Сканирующая лазеротерапия с применением биологических обратных связей и мехатронные аспекты проектирования медицинских установок.....	101
<i>Лебедев Г.Н., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк, Дао Нгок Тхай</i> Автоматизированная система управления безопасным движением наземного и воздушного транспорта при их сближении.....	109
<i>Слепцов В.В., Васильев А.М., Прокуратов И.И., Федотов А.Н.</i> Вопросы устойчивости информационно-измерительных и управляющих систем электромеханических комплексов.....	116
<i>Деулин Б.И.</i> Автоматизированный спектрофотометр с лазерным источником света.....	122

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Кривоносов В.А., Бабенков В.А.</i> Непрерывно-дискретный наблюдатель состояния химико-технологического процесса.....	128
<i>Поляков С.А., Волков М.А.</i> Экспрессное измерение октанового числа дизелькометрическим способом.....	136
<i>Бондарева Л.А., Суханова М.В.</i> Исследование шероховатой поверхности листьев растений.....	144



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

№ 1 (303) 2014

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

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

Editorial council

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president
Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-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
Kopylov Y.R. 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., Acad-
emician 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 Chossee, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,
55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Agency
of supervision in sphere of commu-
nication, 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, 2014

Contents

Natural science

<i>Romashin S.N., Khoroshilova M.V., Shorkin V.S., Sami Al Shatebi</i> Dependence of the energy of adhesion from the thickness for graphen films.....	3
<i>Goloveshkin V.A., Kalugin I.A., Kozyrev YU.M., Ponomarev A.V., Yablochko S.V.</i> Evaluation of beam axial deformation under application of coating from powdered material.....	12
<i>Hasanov F.F.</i> Periodic problem of crack nucleation in the fibre of linearly reinforced composites under longitudinal shear.....	18
<i>Zulfugarov E.I.</i> Modelling of curved crack nucleation in automobile brake drum.....	24

Process modeling

<i>Galatov K.S.</i> Regression model of process proskating rinks of the core of the chicken feather corrugated roller on the flat surface.....	31
<i>Plahotnikova E.V., Protasev V.B.</i> Improvement of quality of electrodynamic systems «the electric drive-stop valves» by increase of coherence and functional compatibility of their elements.....	37
<i>Skvortsov V.N., Puchkov V.N., Albagaciev A.YU.</i> Evaluation of elastoplastic properties of frictional contact friction carbon friction composites.....	45

Construction, calculation, material

<i>Auchynnikau Y.V., Chekan N.M., Akula I.P.</i> Tribological characteristics coatings AlTiN formed by plasma chemical deposition.....	55
<i>Fedorov T.V.</i> An approximation of experimental strain-stress curves by nonuniform rational B-Spline (NURBS).....	64

Machine building technology and toolware

<i>Kanatnikov N.V., Tarapanov A.S.</i> Production testing of gear shaping cutters with the differentiat-ed schemes of cutting.....	69
<i>Komarov V.A., Pleshakov V.V., Sapronov A.A.</i> Improving the efficiency of millinghardened steel parts.....	76
<i>Slominskaya E.N., Losev A.V., Fadeev A.V.</i> Technological system for ensuring industrial purity precision parts.....	80

Machine, apparatus, technology light and food industry

<i>Moskina E.L., Prokopova E.V., Moskin A.A., Dygikov N.V.</i> Technological features of cutting of textile cloths with the polyurethane fibres.....	89
--	----

Innovation and frame in machine building

<i>Stepanova E.YU.</i> Problems of training engineering and technical personnel of the integrated structures for the defense-industrial sector.....	94
---	----

Instrument making and biotechnological system

<i>Shalobaev E.V., Dunaev A.V., Kozyreva O.D.</i> Scan laser therapy with the use of biological feed-backs and mechatronic aspects design of medical devices.....	101
<i>Lebedev G.N., Tin Phone Kyaw, Zaw Min Htike, Dao Ngoc Thai</i> Assigning dynamic priorities when servicing aircraft with an arbitrary rate during approach and landing flight in formation.....	109
<i>Slepsov V.V., Vasilyev A.M., Prokuratov I.I., Fedotov A.N.</i> Questions of stability of information-measuring and operating systems of electromechanical complexes.....	116
<i>Deulin B.I.</i> Automated spectrophotometer with a laser light source.....	122

Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Krivososov V.A., Babenkov V.A.</i> Continuous and discrete state observer of chemicotechnological process.....	128
<i>Polyakov S.A., Volkov M.A.</i> The express measurement of octane number via dielcometric method.....	136
<i>Bondareva L.A., Sukhanova M.V.</i> Study of surface roughness leaves of plants.....	144

The journal is on the List of the peer-reviewed journals and editions stated by the High Attestation Commission at the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the publication of the main scientific results of the thesis for the academic degree.

УДК 538.9, 539.3

С.Н. РОМАШИН, М. В. ХОРОШИЛОВА, В.С. ШОРКИН, САМИ АЛЬ ШАТЕБИ

**ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГИИ АДГЕЗИИ
ГРАФЕНОВОЙ ПЛЕНКИ ОТ ЕЕ ТОЛЩИНЫ**

Представлена удовлетворительно согласующаяся с экспериментом для графеновой пленки на биоксиде кремния зависимость энергии адгезии от ее толщины. Зависимость энергии адгезии тонких пленок и твердой основы, от их толщины важна сама по себе, а также, если она экспериментально доказана, как подтверждение правильности математической модели, в рамках которой она обнаружена. То, что такая зависимость существует, является известным экспериментальным фактом. Однако, найти ее теоретически трудно. Работы, описывающие явление адгезии с точки зрения физики твердого тела оперируют обычно с полубесконечными телами. В работе она определена в рамках механики деформируемого твердого тела.

Ключевые слова: энергия адгезии, свободная энергия, графеновая мембрана, упругая среда второго порядка, волнистость поверхности, связь адгезии и толщины пленки, константы упругого состояния, напряжения, деформации

Введение

В работе [1] отмечена зависимость величины энергии адгезии от толщины пленки (мембраны) графена. В работе [2] представлены результаты экспериментальных исследований зависимости энергии адгезии графеновой пленки с волнистой поверхностью диоксида кремния от количества ее атомных слоев (рис. 1 [2]).

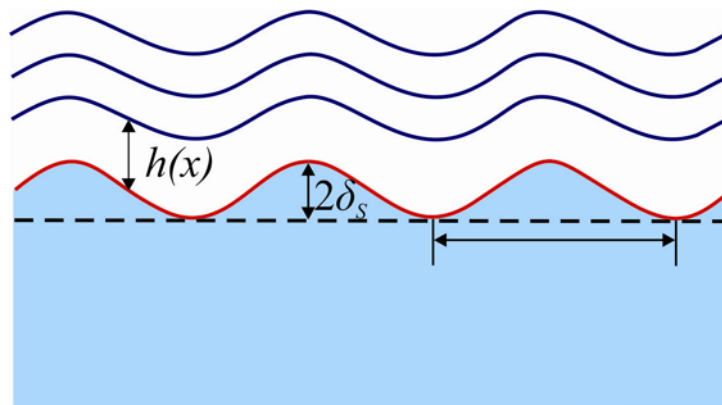


Рисунок 1 – Схема расположения графеновой мембраны на поверхности SiO_2

В данной работе делается попытка теоретической оценки этой зависимости без учета влияния на нее волнистости поверхности субстрата. Энергия адгезии тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ определяется убывлю на единицу площади образовавшегося адгезионного шва – поверхности стыка, вдоль которой произошло залипание, их свободной энергии [3]. Данное определение реализуется равенством

$$F_a = W_{p(1,2)} - (W_{p(1)} + W_{p(2)}), \quad (1)$$

где $W_{p(j)}$ ($j=1, 2$), $W_{p(1,2)}$ – поверхностные энергии свободных от адгезии тел $B_{(j)}$ до и после вступления их в адгезионный контакт соответственно. В изотермических обратимых процессах образования свободных поверхностей $A_{(1)}$ и $A_{(2)}$ тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$, адгезионного контакта между ними, величины $W_{p(j)}$ – равны изменению свободной энергии $B_{(j)}$, приходящемуся на

единицу площади $A_{a(j)} \equiv A_a$ – участка границы тела $B_{(j)}$, вдоль которого произошел адгезионный контакт. Если процесс вступления в адгезионный контакт тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ является адиабатическим (система $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ изолирована), то при адгезии происходят изменения их суммарной потенциальной и тепловой энергий. Однако, если температуру системы взаимодействующих тел в процессе адгезии поддерживать постоянной (система $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ открыта для теплообмена с окружающей средой), то изменения свободной энергии, сопровождающие адгезию можно оценить по изменению энергии упругих деформаций, сопровождающих адгезию, но с точностью до тепловых потерь. Эти потери далее считаем пренебрежимо малыми.

Модель материалов, вступающих в состояние адгезии. Для решения проблемы оценки энергии упругих деформаций при адгезии двух тел использована модель упругой среды второго порядка с начальным напряженным состоянием [4, 5]. Для описания деформированного состояния она использует не один, как классическая теория упругости, а два градиента перемещения $\nabla \vec{u} = \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}}$ и $\nabla^2 \vec{u} = \frac{d^2 \vec{u}}{d\vec{r}^2}$ ($\vec{r} = x_i \vec{e}_i$ – радиус-вектор точки в отсчетной конфигурации системы, $\vec{e}_i \cdot \vec{e}_j = \delta_{ij}$, δ_{ij} – символ Кронекера, $i, j = 1, 2, 3$). Эти градиенты являются обобщенными перемещениями, на которых совершают работу обобщенные силы $P^{(1)}$ и $P^{(2)}$ – тензоры напряжений второго и третьего рангов соответственно. Выбор модели обусловлен тем, что в состоянии адгезии, когда граница между контактирующими телами теряется [6], материальное волокно, составленное из частиц контактирующих тел, пересекающее поверхность контакта, сплошное и гладкое до деформации, должно сохранять не только сплошность, но и гладкость после деформации. Сплошность гарантируется использованием сопряжения на границе адгезионного контакта полей перемещений $\vec{u}_{(1)}(\vec{r})$ и $\vec{u}_{(2)}(\vec{r})$. Гладкость волокна можно обеспечить сопряжением нормальных составляющих градиентов перемещений $\nabla \vec{u}_{(1)}$ и $\nabla \vec{u}_{(2)}$.

Квадратичная форма, выражающая изменение объемной плотности w потенциальной энергии при возникновении деформаций, определяется выражением

$$w = \frac{2A_1 - A_2}{2} g_{ij} g_{ij} + \frac{A_2}{2} g_{kk} g_{ll} + B Z_{ijk} Z_{ijk} + \pi_0 \delta_{ij} e_k Z_{ijk}. \quad (2)$$

В этом выражении $g_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$; $Z_{ijk} = u_{i,jk}$; $A_1, A_2, B = A_1 b^2, \pi_0$ – константы, характеризующие упругие свойства материала; $\vec{e} = \vec{e}(\vec{r})$ ($|\vec{e}| = 1$) – поле силовых направлений, задаваемое в отсчетной конфигурации каждого тела. На поверхности тела вектор \vec{e} совпадает с внешней единичной нормалью \vec{n} .

Если тензоры g_{ij}, Z_{ijk} , характеризующие деформированное состояние среды, определяются в процессе решения конкретных задач, то характеристики свойств материала должны быть известны заранее. Для констант, характеризующих эти свойства, справедливы соотношения

$$2A_1 = 2\mu + \lambda = E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad A_2 = \lambda = E \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (3)$$

В этих равенствах E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, μ и λ – параметры Ламэ.

Теория учитывает наличие в среде внутреннего начального напряженного состояния. Оно описывается тензором

$$P_0^{(2)} = T_0 \cdot \vec{e}, \quad (4)$$

где $T_0 = \pi_0 \delta_{ij} \delta_{kl} \vec{e}_i \vec{e}_j \vec{e}_k \vec{e}_l$;

В общем случае, когда в материале тела развиваются деформации, напряженное состояние характеризуется тензорами $P^{(1)}$ и $P^{(2)}$ определяемыми соотношениями

$$P_{ij}^{(1)} = \frac{\partial w}{\partial g_{ij}}, P_{ijk}^{(2)} = \frac{\partial w}{\partial Z_{ijk}} \quad (5)$$

Константы упругого состояния материала определяются из условия равенства потенциальной энергии одной элементарной ячейки атомной структуры [7] и энергии упругих деформаций того же объема сплошной упругой среды. В первом случае энергия выражается через известные характеристики потенциала взаимодействия атомов (например, потенциал Ленарда–Джонса [8]). Во втором случае та же энергия выражается через характеристики сплошного упругого материала. В линейной теории упругости задается равномерное растяжение атомной цепочки и упругой среды соответственно. В рассматриваемой ситуации задается неравномерное растяжение, характеризуемое квадратичной зависимостью перемещений точек от их координат. В результате можно получить следующие оценочные формулы.

$$\pi_0 \cong 0,36 \left(\frac{\mu}{l_0^2} \right), 2A_1 \cong 7,08 \left(\frac{\mu}{l_0^3} \right), B \cong 0,75 \left(\frac{\mu}{l_0} \right), b = \sqrt{\frac{B}{A_1}} \cong 0,34l_0 \quad (6)$$

Здесь l_0 – среднее межатомное расстояние; $\mu = \varphi_{\max}$ – максимальное значение величины потенциала межатомного взаимодействия рассматриваемого материала. Учитывая ранее представленную связь величин $2A_1$ и модуля Юнга E , параметр $\mu = \varphi_{\max}$ можно выразить через известный модуль Юнга, не устанавливая конкретный вид потенциала межатомного взаимодействия, и использовать эту связь в дальнейших расчетах.

Зависимость энергии адгезии пластины от ее толщины. Рассматривается слоистая система, состоящая из двух бесконечно протяженных пластин. Первая из них – тело $B_{(1)}$, имеющая толщину $h_{(1)}$, моделирует тонкую пленку. Вторая – тело $B_{(2)}$, имеющая толщину $h_{(2)}$, моделирует основу. Предполагается, что $h_{(1)} \ll h_{(2)}$. Так что величиной $h_{(1)}/h_{(2)}$ можно пренебречь по сравнению с единицей

$$\frac{h_{(1)}}{h_{(2)}} = o(1) \quad (7)$$

Необходимые для расчетов механические и физические характеристики материалов обеих пластин предполагаются известными.

Эти величины определяются на основании решения сопряженной задачи об адгезии двух тел в рамках принятой модели среды, решенной с учетом соответствующих допущений о ходе процесса деформирования.

Задача об адгезии двух тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ рассматривается для ситуации, когда внешние воздействия на них отсутствуют. Система уравнений равновесия для $B_{(j)}$, краевых условий на свободных поверхностях $A_{(j)}$ и условия сопряжения на A_a имеет вид:

$$\nabla \cdot \left(P_{(j)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{(j)}^{(2)} \right) = \vec{0}; \quad \vec{r} \in V_{(j)}, \quad (8)$$

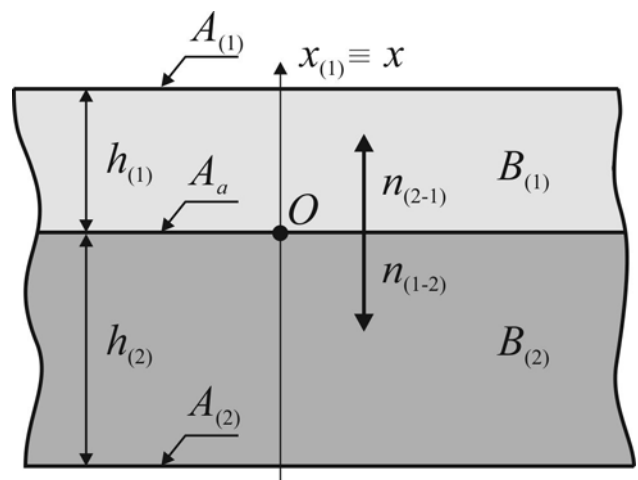


Рисунок 2 – Система двух пластин разной толщины, находящихся в адгезионном контакте

$$\vec{n}_{(j)} \cdot \left(P_{(j)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{(j)}^{(2)} \right) - \nabla_A \cdot (\vec{n}_{(j)} \cdot P_{(j)}^{(2)}) = \vec{0}; \quad \vec{r} \in A_{(j)}. \quad (9)$$

$$(\vec{n}_{(j)} \vec{n}_{(j)}) \cdot P_{(j)}^{(2)} = 0; \quad \vec{r} \in A_{(j)} \quad (10)$$

$$\vec{n}_{(1-2)} \cdot \left(P_{(1)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{(1)}^{(2)} \right) - \nabla_A \cdot (\vec{n}_{(1-2)} \cdot P_{(1)}^{(2)}) +$$

$$+ \vec{n}_{(2-1)} \cdot \left(P_{(2)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{(2)}^{(2)} \right) - \nabla_A \cdot (\vec{n}_{(2-1)} \cdot P_{(2)}^{(2)}) = \vec{0} \quad ; \quad \vec{r} \in A_a \quad (11)$$

$$(\vec{n}_{(1-2)} \vec{n}_{(1-2)}) \cdot P_{(1)}^{(2)} + (\vec{n}_{(2-1)} \vec{n}_{(2-1)}) \cdot P_{(2)}^{(2)} = 0. \quad \vec{r} \in A_a \quad (12)$$

$$\vec{u}_{(1)} = \vec{u}_{(2)}; \quad \vec{n}_{1-2} \cdot (\nabla \vec{u}_{(1)}) = -\vec{n}_{2-1} \cdot (\nabla \vec{u}_{(2)}). \quad \vec{r} \in A_a \quad (13)$$

В этих равенствах учтено, что возможно представление $\nabla = \nabla_A + \nabla_{\vec{n}}$, где ∇_A - градиент вдоль поверхности, а $\nabla_{\vec{n}}$ - вдоль нормали к ней.

В рассматриваемой ситуации, когда делается пренебрежение волнистостью поверхности субстрата, в отсчетном состоянии пластины занимают области $V_{(1)}$ и $V_{(2)}$ соответственно, описываемые в прямоугольной декартовой системе координат $(x_1 \equiv x, x_2, x_3)$ неравенствами (рис. 2):

$$V_{(1)} : 0 < x \equiv x_1 < h_{(1)}, \quad -\infty < x_2, x_3 < +\infty$$

$$V_{(2)} : -h_{(2)} < x \equiv x_1 < 0, \quad -\infty < x_2, x_3 < +\infty, \quad (14)$$

Так что поверхностью их контакта является плоскость

$$A_a : x \equiv x_1 = 0, \quad -\infty < x_2, x_3 < +\infty; \quad (15)$$

где x - координата, отсчитываемая от плоскости контакта в направлении $B_{(1)}$, перпендикулярном к ней.

При решении рассматриваемой задачи предлагается использовать гипотезу об одномерности процесса деформации контактирующих тел, происходящей вдоль нормали к плоскости контакта. Тогда

$$u_{1(k)} = u_{(k)}(x), \quad u_{2(k)} = u_{3(k)} = 0 \quad (16)$$

Для определения F_a предлагается использовать величины, вычисляемые по формулам:

$$W_{p(1,2)} = \int_{-h_{(1)}}^0 w_{1(1)}(x) dx + \int_0^{h_{(2)}} w_{1(2)}(x) dx,$$

$$W_{p(1)} = \int_{-h_{(1)}}^0 w_{(1)}(x) dx, \quad W_{p(2)} = \int_0^{h_{(2)}} w_{(2)}(x) dx, \quad (17)$$

где $w_{(j)}$, $w_{1(j)}$ - плотность потенциальной энергии тела с номером (j) до и после его вступления в адгезионный контакт.

Решение задачи о деформированном состоянии пластин, находящихся в состоянии адгезии, описанным выше методом, в рамках предложенной для этой цели модели механического состояния упругого материала дало возможность получить аналитическое выражение, связывающее величину энергии адгезии F_a , характеристики механических свойств материалов пластин и их толщины.

$$\begin{aligned} \Delta_1 = & -\left(\frac{\pi_{0(1)}}{b_{(1)}}\right)\left(1 - \exp\left(-\frac{h_{(1)}}{b_{(1)}}\right)\right)\left(1 + \exp\left(-\frac{2h_{(2)}}{b_{(2)}}\right)\right) + \\ & + \left(\frac{\pi_{0(2)}}{b_{(2)}}\right)\left(1 - \exp\left(-\frac{h_{(1)}}{b_{(1)}}\right)\right)\left(1 + \exp\left(-\frac{2h_{(2)}}{b_{(2)}}\right)\right) - \\ & - \left(\frac{2A_{1(2)}}{2A_{1(1)}}\right)\left(\frac{\pi_{0(1)}}{b_{(1)}}\right)\left[\exp\left(-\frac{h_{(1)}}{b_{(1)}}\right)\right]\left[1 - \exp\left(-\frac{2h_{(2)}}{b_{(2)}}\right)\right] - \\ & - \left(\frac{\pi_{0(2)}}{b_{(2)}}\right)\left[\exp\left(-\frac{h_{(2)}}{b_{(2)}}\right)\right]\left[1 - \exp\left(-\frac{2h_{(2)}}{b_{(2)}}\right)\right] \\ \Delta_2 = & -\left(\frac{\pi_{0(1)}}{b_{(1)}}\right)\left(1 - \exp\left(-\frac{h_{(1)}}{b_{(1)}}\right)\right)\left(1 + \exp\left(-\frac{2h_{(1)}}{b_{(1)}}\right)\right) - \\ & - \left(\frac{\pi_{0(2)}}{b_{(2)}}\right)\left(1 - \exp\left(-\frac{h_{(2)}}{b_{(2)}}\right)\right)\left(1 + \exp\left(-\frac{2h_{(1)}}{b_{(1)}}\right)\right) - \\ & - \left(\frac{2A_{1(1)}}{2A_{1(2)}}\right)\left(\frac{\pi_{0(2)}}{b_{(2)}}\right)\left[\exp\left(-\frac{h_{(2)}}{b_{(2)}}\right)\right]\left[1 - \exp\left(-\frac{2h_{(1)}}{b_{(1)}}\right)\right] + \\ & + \left(\frac{\pi_{0(1)}}{b_{(1)}}\right)\left[\exp\left(-\frac{h_{(1)}}{b_{(1)}}\right)\right]\left[1 + \exp\left(-\frac{2h_{(1)}}{b_{(1)}}\right)\right] \end{aligned}$$

Данные выражения очень громоздки и не дают ясного представления о характере зависимости энергии адгезии от толщин соединяемых пластин. Однако для практически важного случая, когда одна из толщин на много больше другой и значительно превосходит параметр b соответствующего материала, зависимость приобретает простой вид.

$$F_a = F_a^\infty + F_a^1 \exp\left(-\frac{h_{(1)}}{b_{(1)}}\right). \quad (20)$$

Здесь F_a^∞ , F_a^1 - константы, выражаемые через характеристики механических свойств материалов.

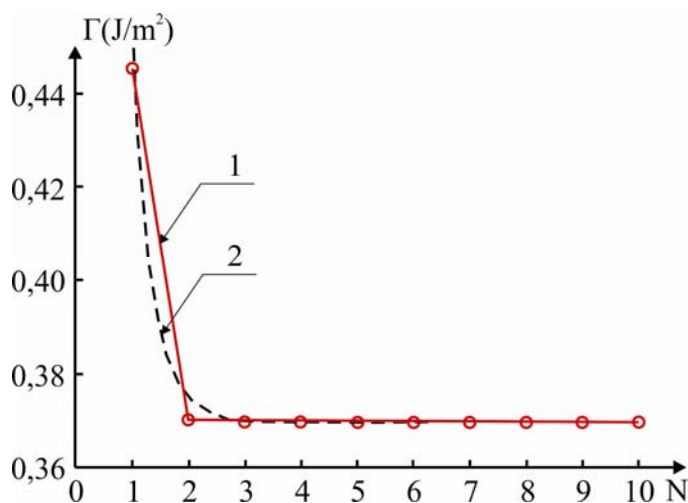


Рисунок 3 – Зависимость энергии адгезии от количества монослоев N графена
пунктир – аппроксимирующая расчетная кривая

Полученный результат позволяет проводить его сравнение с экспериментальными данными.

Сравнение с экспериментом. При изменении толщины графеновой пленки на биоксиде кремния (SiO_2) от одного атомного слоя до толщины в $N = 2 - 5$ слоев энергия адгезии меняется соответственно от значения, равного $F_a^1 = 0,45 J/m^2$ до $F_a^\infty = 0,37 J/m^2$ соответственно. В работе [4] представлены результаты экспериментальных исследований этой зависимости (линия 1 на рис. 3)

Сопоставляя вид этой линии с видом зависимости (16) можно убедиться в их качественном совпадении. Количе-

ственное сопоставление зависимости (22) и той, которая иллюстрируется линией 1 рисунка 3 реализовано для следующих данных о графене [9, 10]: модуль Юнга $E_{(1)} \cong 1,08 \cdot 10^{12} \text{ Н / м}^2$, коэффициент Пуассона $\nu_{(1)} \cong 0,2$; биоксиде кремния (SiO_2): модуль Юнга $E_{(2)} \cong 8 \cdot 10^8 \text{ Н / м}^2$, коэффициент Пуассона $\nu_{(2)} \cong 0,25$ [11]. Используя эти данные, при условии $h_{(1)} \rightarrow \infty$, $h_{(2)} \rightarrow \infty$ можно получить, что вычисленное значение энергии адгезии при больших значениях толщин графенового слоя и субстрата $F_a^\infty = 0,36 \text{ Дж / м}^2$. Рисунок 3 свидетельствует о величине, равной $F_a^\infty|_{\text{exp}} = 0,37 \text{ Дж / м}^2$. В экспериментах [4] для разных типов волнистости эта величина является разной, меняясь от $F_a^\infty|_{\text{exp}} = 0,37 \text{ Дж / м}^2$ до $F_a^\infty|_{\text{exp}} = 0,45 \text{ Дж / м}^2$. Тем не менее, соизмеримость расчетного и экспериментального значений F_a^∞ свидетельствует о том, что предложенная математическая модель, описывающая зависимость энергии адгезии пленки от ее толщины не только качественно, но и количественно правильно описывает ее.

Наиболее веским аргументом в пользу этого утверждения является практическое совпадение экспонент, характеризующих скорость убывания энергии адгезии в зависимости от толщины графеновой пленки. Учитывая, что в выражении (16) $x = N l_{0(1)}$, $b_{(1)} = 0,34 l_{0(1)}$, а также подбирая значение $F_a^1 \cong 0,8 \text{ Дж / м}^2$ можно получить его аналог в виде

$$F_a = 0,09 + 3,6 \exp(-2,94 N) \quad (21)$$

График этой зависимости (линия 2) представлен на рисунке 3. Он удовлетворительно количественно соответствует экспериментальным данным, соединенным кривой 1 того же рисунка.

Обсуждение результатов. В данной работе показано, что рассматриваемая модель упругой среды, качественно и количественно правильно отражает зависимость величины энергии адгезии от толщины графеновой пленки. Это, в свою очередь, свидетельствует об адекватности отражения в ее рамках процессов, происходящих при адгезии твердых тел, и возможности применения ее для практических расчетов. Возможно использование более точной модели градиентной упругой среды, представленной в [12], частным случаем которой является модель [4]. Однако, во-первых, это исключит возможность получения представленного выше аналитического решения задачи об адгезии двух пластин. Во-вторых, в увеличении точности при пренебрежении волнистостью поверхности субстрата нет необходимости.

Работа выполнялась в рамках базовой части государственного задания на 2014 г., код проекта 286, в соответствии с приоритетным направлением развития научной и инновационной деятельности в Госуниверситете – УНПК «Нанотехнологии, наноматериалы и изделия» [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koenig, S.P. Ultrastrong adhesion of graphene membranes /S. P. Koenig, N.G. Boddeti, M. L. Dunn, and J. S. Bunch //Nature Nanotechnol.- 2011.- 6. – P. 543 – 546.
2. Wei G. Effect of surface roughness on adhesion of grafene membranes /G. Wei, H. Rui // J. Phys. D: Appl. Phys. 4 (2011). 452001 (4 pp), 1 – 4.
3. Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1960. – Т. 1. – 664 с.
4. Шоркин, В.С. Теория упругости поверхностных слоев твердых тел /В.С. Шоркин // Известия ТулГУ. 1995. - Т. 1. - Вып. 2. - С. 169 - 179.
5. Шоркин, В.С. Особенности упругости поверхностных слоев твердых тел /В.С. Шоркин// Упругость и неупругость: Матер. междунар. научн. симп. по проблемам механики деформ. тел / Под ред. И.А. Кийко, М.Ш. Исраилова, Г.Л. Бровко. – М.: МГУ, 2001.– С. 453 – 454.
6. Гиббс, Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика // Дж. В. Гиббс. – М.: Наука, 1982. – 584 с.

7. Лейбфрид, Г. Микроскопическая теория механических и тепловых свойств кристаллов / Г. Лейбфрид. – М.–Л.: Гос. изд-во ф.-м. лит., 1963. – 312 с.
8. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. М.: Наука, 1978. – 792 с.
9. Changgu, Lee. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene / Changgu Lee, Xiaoding Wei, Jeffrey W. Kysar, James Hone // Science. - 2008. - V. 321. - P. 385–388.
10. Квашнин, А.Г. Теоретическое исследование механических свойств графеновых мембран методом молекулярной механики / А.Г. Квашнин, П.Б. Сорокин, Д.Г. Квашнин // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2009, 2 (4), 426 – 431.
11. www. Sammas – Классификация и виды – all – pages. Тип: HTML – документ.
12. Шоркин, В.С. Нелинейные дисперсионные свойства высокочастотных волн в градиентной теории упругости / В.С. Шоркин // Известия РАН. МТТ. - 2011. - № 6. - С. 104-121.
13. Степанов, Ю.С. Научно-образовательный центр нанотехнологий в структуре учебно-научно-производственного комплекса / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Ю. Степанова // Наноинженерия. - № 5. - 2012. – С. 3 – 6.

Ромашин Сергей Николаевич

Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики
302020, г. Орел, Наугорское шоссе 29,
Тел. (4862) 41-98-89
E-mail: sromashin@yandex.ru

Хорошилова Маргарита Вячеславовна

Госуниверситет – УНПК, г. Орел
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики
E-mail: hamster08@yandex.ru

Шоркин Владимир Сергеевич

Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики
302020, г. Орел, Наугорское шоссе 29
Тел. (4862) 41-98-89
E-mail: Shorkin@ostu.ru

Сами Аль Шатеби

Госуниверситет – УНПК, г. Орел
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Аспирант кафедры физики
E-mail: Shorkin@ostu.ru

S.N. ROMASHIN, M.V. KHOROSHILOVA, V.S. SHORKIN, SAMI AL SHATEBI

**DEPENDENCE OF THE ENERGY OF ADHESION
FROM THE THICKNESS FOR GRAPHEN FILMS**

Presented dependence of the energy of adhesion from its thickness agrees satisfactorily with the experimental data for graphen films on silicon dioxide. The energy of adhesion between thin films and a solid base dependent from their thickness, this phenomenon is important by itself, and if it is experimentally proved, as a confirmation of the correctness of mathematical model in the framework of which it is encountered. The fact that such dependence exists is well-known experimental fact. However, it is difficult to express this dependence theoretically. In the papers describing the phenomenon of adhesion with the point of view of solid-state physics researchers operate normally with half-infinite bodies. In the work this dependence is defined within the mechanics of a deformable solid body.

Keywords: *the energy of adhesion, graphen membrane, the elastic environment of second order, the surface's sinuosity, dependence of the energy of adhesion from film's thickness, constants characterizing the elastic state, the stress and the deformation*

BIBLIOGRAPHY

1. Koenig, S.P. Ultrastrong adhesion of graphene membranes /S. P. Koenig, N.G. Boddeti, M. L. Dunn, and J. S. Bunch //Nature Nanotechnol.- 2011.- 6. – P. 543 – 546.

2. Wei, G. Effect of surface roughness on adhesion of grafene membranes /G. Wei, H. Rui // J. Phys. D: Appl. Phys. 4 (2011). 452001 (4 pp), 1 – 4.
3. Fizicheskiy enciklopedicheskiy slovar. – M.: Sovetskaya enciklopediya, 1960. – Т. 1. – 664 s.
4. Shorkin, V. S. Teoriya uprugosti poverhnostnykh sloev tverdykh tel /V.S. Shorkin // Izvestiya TulGU. 1995. - Т. 1. - Vyp. 2. - S. 169 - 179.
5. Shorkin, V.S. Osobennosti uprugosti poverhnostnykh sloev tverdykh tel /V.S. Shorkin// Uprugost i neuprugost: Mater. mezhdunar. nauchn. simp. po problemam mehaniki deform. tel / Pod red. I.A. Kiyko, M.Sh. Israilova, G.L. Brovko. – M.: MGU, 2001.– S. 453 – 454.
6. Gibbs, Dzh. V. Termodinamika. Statisticheskaya mehanika // Dzh. V. Gibbs. – M.: Nauka, 1982. – 584 s.
7. Leybfrid, G. Mikroskopicheskaya teoriya mehanicheskikh i teplovykh svoystv kristallov / G. Leybfrid. – M.– L.: Gos. izd-vo f.-m. lit., 1963. – 312 s.
8. Kittel CH. Vvedenie v fiziku tverdogo tela / CH. Kittel. M.: Nauka, 1978. – 792 s.
9. Changgu, Lee. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene / Changgu Lee, Xiaoding Wei, Jeffrey W. Kysar, James Hone // Science. - 2008. - V. 321. - P. 385–388.
10. Kvashnin, A.G. Teoreticheskoe issledovanie mehanicheskikh svoystv grafenovykh membran metodom molekulyarnoy mehaniki / A.G. Kvashnin, P.B. Sorokin, D.G. Kvashnin // Journal of Siberian Federal University. Vfhematics & Physics 2009, 2 (4), 426 – 431.
11. www. Sammas – Klassifikaciya i vidy – all – pages. Tip: HTML – dokument.
12. Shorkin, B.C. Nelineynye dispersionnye svoystva vysokochastotnykh voln v gradientnoy teorii uprugosti / V.S. Shorkin // Izvestiya RAN. MTT. - 2011. - № 6. - S. 104-121.
13. Stepanov, Yu.S. Nauchno-obrazovatelnyy centr nanotekhnologiy v strukture uchebno-nauchno-proizvodstvennogo kompleksa /Yu.S. Stepanov, G.V. Barsukov, E.Yu. Stepanova // Nanoinzheneriya. - № 5. – 2012. – S. 3 – 6.

Romashin Sergey Nikolaevich

State University - UNPK, Orel
Candidate of physico-mathematical Sciences, associate Professor of physics
302020, Orel, Naugorskoe highway 29
Phone (4862) 41-98-89
E-mail: sromashin@yandex.ru

Khoroshilova Margarita Vyacheslavovna

State University - UNPK, Orel,
Candidate of physico-mathematical Sciences, associate Professor of physics
302020, Orel, Naugorskoe highway 29
Phone. (4862) 41-98-89
E-mail: hamster08@yandex.ru

Sorkin Vladimir Sergeevich

State University - UNPK, Orel
Doctor of physico-mathematical Sciences, Professor, physics Department
302020, Orel, Naugorskoe highway 29
Phone (4862) 41-98-89
E-mail: shorkin@ostu.ru

Sami Al Shatebee

State University - UNPK, Orel
Graduate student
302020, Orel, Naugorskoe highway 29
Phone. (4862) 41-98-89
E-mail: shorkin@ostu.ru

В.А. ГОЛОВЕШКИН, И.А. КАЛУГИН, Ю.М. КОЗЫРЕВ,
А.В. ПОНОМАРЕВ, С.В. ЯБЛОЧКО

ОЦЕНКА ОСЕВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВАЛА ПРИ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЯ ИЗ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА

При нанесении покрытий из порошкового материала на вал в процессе горячего изостатического прессования (ГИП) в отдельных случаях наблюдается значительная осевая деформация. В работе получены аналитические оценки значений данной деформации.

Ключевые слова: пластически сжимаемый материал, условие текучести Грина.

Традиционным процессом производства изделий из порошковых материалов является процесс горячего изостатического прессования (ГИП) – процесс высокотемпературного уплотнения порошковых материалов, помещенных в капсулу, под действием высокого внешнего давления.

Процесс ГИП может быть использован для повышения эксплуатационных характеристик вала – на его поверхность наносится слой из порошкового материала. В ходе нанесения такого покрытия наблюдается осевая деформация вала – его усадка вдоль оси. Цель данной работы состоит в выяснении причины этого явления и аналитической оценке итоговой осевой деформации.

Задача рассматривается в осесимметричной постановке в цилиндрической системе координат. Температура предполагается постоянной по объему. Особенности влияния неоднородного температурного поля исследовались в работах [1, 2]. Осевой размер вала существенно превышает его радиус, поэтому влиянием торцов на процесс деформации пренебрегаем.

Пусть R_1 – текущий радиус вала, H – высота, $R_1 < r < R_2$ – размер слоя порошкового материала, $R_2 < r < R_3$ – размер внешней капсулы (толщина стенок капсулы в подобных задачах существенно меньше радиального размера вала и толщины порошкового слоя), ρ – относительная плотность порошка. Начальные значения этих величин соответственно обозначим R_{10} , R_{20} , R_{30} , H_0 , ρ_0 .

С учетом осевой симметрии в цилиндрической системе координат (r, z) имеем 3 области. Область 1: $0 < r < R_1$, $0 < z < H$ – вал, рассматриваемый как несжимаемый идеально пластический материал с пределом текучести Y_1 . Область 2: $R_1 < r < R_2$, $0 < z < H$ – порошковый материал; поведение которого описывается моделью Грина. Область 3: $R_2 < r < R_3$, $0 < z < H$ – капсула, поведение материала которой описывается так же условием идеальной пластичности с пределом текучести Y_3 .

Считаем, что деформация вдоль оси z постоянна по объему, а радиальные скорости зависят только от r .

Общая постановка задачи включает следующие моменты.

Уравнение равновесия:

$$\operatorname{div} \bar{\sigma} = 0 \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}$ – тензор напряжений.

Для описания механических свойств порошкового материала используется условие текучести Грина [3-4]:

$$\frac{\sigma^2}{f_2^2} + \frac{S^2}{f_1^2} = T^2 \quad (2)$$

где σ – среднее напряжение;

S^2 – интенсивность девиатора тензора напряжений;

f_2 и f_1 – экспериментальные функции относительной плотности ρ ;

T – предел текучести монолита.

Для описания поведения материала вала и капсулы используется условие идеальной пластичности:

$$S^2 = Y^2 \quad (3)$$

где Y – предел текучести.

При исследовании поведения вала и капсулы используется условие несжимаемости:

$$\operatorname{div} \bar{u} = 0 \quad (4)$$

где \bar{u} – вектор скоростей перемещений.

Связь тензора напряжений σ_{ij} и тензора скоростей деформаций ε_{ij} определяется ассоциированным законом течения:

$$\varepsilon_{ij} = \psi \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

где $\Phi(\sigma_{ij}, \rho) = 0$ – уравнение поверхности текучести.

Для определения плотности используется уравнение неразрывности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \bar{u} = 0 \quad (6)$$

На внешней границе капсулы приложено равномерное внешнее давление P .

Соотношения (1-6) определяют математическую постановку задачи. В дальнейшем при исследовании будет использован вариационный принцип минимума мощности. Определим мощность внутренних сил $w = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}$ в единице объема.

Для порошкового материала с учетом осевой симметрии из соотношений (2, 5) следует:

$$w = \frac{T}{3} \sqrt{(9f_2^2 + 4f_1^2)(\varepsilon_r + \varepsilon_\phi + \varepsilon_z)^2 - 12(\varepsilon_r \varepsilon_\phi + \varepsilon_r \varepsilon_z + \varepsilon_\phi \varepsilon_z - \varepsilon_{rz}^2)} \quad (7)$$

Для материала вала и капсулы с учетом (3-5) имеем:

$$w = \frac{2Y}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rz}^2 - (\varepsilon_r \varepsilon_\phi + \varepsilon_r \varepsilon_z + \varepsilon_\phi \varepsilon_z)} \quad (8)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\phi, \varepsilon_z, \varepsilon_{rz}$ – соответствующие составляющие тензора скоростей деформаций.

Обозначим компоненты скорости u, v вдоль осей r, z соответственно. Поскольку осевая деформация предполагалась постоянной по объему, примем:

$$\varepsilon_z = -\varepsilon \quad (9)$$

Так как математическая постановка задачи допускает произвольные перемещения вдоль оси z , то можно принять:

$$v = -\varepsilon z \quad (10)$$

В силу условия несжимаемости:

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} - \varepsilon = 0$$

Тогда в зоне 1 получим:

$$u_1 = \frac{\varepsilon}{2} r \quad (11)$$

Аналогично в области 3:

$$u_3 = \frac{\varepsilon}{2} r - B \frac{R_2^2}{r} \quad (12)$$

где B – постоянная интегрирования.

В области 2 радиальную скорость представим в виде:

$$u_2 = C_1 r + \frac{C_2}{r}$$

Предполагая непрерывность радиальных скоростей на границах областей, получаем:

$$u_2 = \frac{\varepsilon}{2} r - \frac{BR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} r + \frac{BR_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{1}{r} \quad (13)$$

Согласно (8,11), W_1 – полная мощность внутренних сил в области 1, равна:

$$W_1 = \pi R_1^2 H Y_1 \varepsilon \quad (14)$$

Согласно (8,12), W_3 – полная мощность внутренних сил в области 3, равна:

$$W_3 = \frac{\pi R_2^2 H Y_3}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{3\varepsilon^2 z_3^2 + 4B^2} - \sqrt{3\varepsilon^2 + 4B^2} + \frac{2B}{\sqrt{3}} \ln \left(z_3 \frac{2B + \sqrt{3\varepsilon^2 + 4B^2}}{2B + \sqrt{3\varepsilon^2 z_3^2 + 4B^2}} \right) \right] \quad (15)$$

где $z_3 = \frac{R_3^2}{R_2^2} > 1$.

Согласно (8,13), W_2 – полная мощность внутренних сил в области 2, равна:

$$W_2 = 2\pi R_2^2 H T \left[G_1 - z_1 G_2 + \frac{f_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Bz_1}{1-z_1} \ln \left(\frac{f_1 B + \sqrt{3}(1-z_1)G_2}{f_1 B + \sqrt{3}(1-z_1)G_1} \right) \right] \quad (16)$$

где $z_1 = \frac{R_1^2}{R_2^2} < 1$, $G_1 = \sqrt{f_2^2 \left(\frac{B}{1-z_1} \right)^2 + \frac{f_1^2}{36} \left(3\varepsilon - \frac{B}{1-z_1} \right)^2 + \frac{f_1^2}{3} \left(\frac{Bz_1}{1-z_1} \right)^2}$,

$$G_2 = \sqrt{f_2^2 \left(\frac{B}{1-z_1} \right)^2 + \frac{f_1^2}{36} \left(3\varepsilon - \frac{B}{1-z_1} \right)^2 + \frac{f_1^2}{3} \left(\frac{B}{1-z_1} \right)^2}$$

На внешней границе приложено постоянное внешнее давление P . Мощность внешних сил на указанном поле скоростей определяется следующими соотношениями:

N_1 – мощность внешних сил на границе $z = 0$, согласно (10) равна нулю;

N_2 – мощность внешних сил на границе $z = H$, согласно (10) равна:

$$N_2 = \pi P R_2^2 H z_3 \varepsilon \quad (17)$$

N_3 – мощность внешних сил на границе $r = R_3$, согласно (12) равна:

$$N_3 = 2\pi P R_2^2 H \left(-\frac{z_3 \varepsilon}{2} + B \right) \quad (18)$$

Тогда полная мощность внешних сил $N = N_1 + N_2 + N_3$ равна:

$$N = P \pi R_2^2 H 2B \quad (19)$$

Полная мощность работы внутренних сил W равна $W = W_1 + W_2 + W_3$.

Из условия $W = N$, получаем соотношение для P :

$$P = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{\pi R_2^2 H 2B} \quad (20)$$

Поле скоростей определяется из условия минимума внешнего давления, то есть минимизации функции (20). В силу однородности относительно поля скоростей функции (20), поле скоростей определяется с точностью до множителя. Положим дополнительно:

$$B = 1 - z_1 \quad (21)$$

Тогда задача определения поля скоростей сводится к отысканию минимума функции $\Phi(\varepsilon)$ для $0 \leq \varepsilon < \infty$, где:

$$\begin{aligned} \Phi(\varepsilon) = & \alpha_1 z_1 \varepsilon + \frac{\alpha_3}{\sqrt{3}} \left[G_3 - G_4 + 2(1-z_1) \ln \left(z_3 \frac{2(1-z_1) + G_4}{2(1-z_1) + G_3} \right) \right] + \\ & + 2 \left[G_6 - G_5 + \frac{f_1}{\sqrt{3}} z_1 \ln \left(\frac{f_1 + \sqrt{3}G_5}{f_1 z_1 + \sqrt{3}G_6} \right) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

здесь $\alpha_1 = \frac{Y_1}{T}$, $\alpha_3 = \frac{Y_3}{T}$, $G_3 = \sqrt{3\varepsilon^2 z_3^2 + 4(1-z_1)^2}$, $G_4 = \sqrt{3\varepsilon^2 + 4(1-z_1)^2}$,

$$G_5 = \sqrt{f_2^2 + \frac{f_1^2}{36}(3\varepsilon - 2)^2 + \frac{f_1^2}{3}}$$
, $G_6 = \sqrt{f_2^2 + \frac{f_1^2}{36}(3\varepsilon - 2)^2 + \frac{f_1^2}{3} z_1^2}$

Определим $\frac{d\Phi}{d\varepsilon}$. Согласно (22):

$$\frac{d\Phi}{d\varepsilon} = \alpha_1 z_1 + \frac{\alpha_3}{\varepsilon \sqrt{3}} [G_3 - G_4] + 6 f_1^2 (3\varepsilon - 2) \frac{1}{36 f_2^2 + f_1^2 (3\varepsilon - 2)^2} [G_6 - z_1 G_5]$$

Так как $z_1 < 1$, $z_3 > 1$, то $\frac{d\Phi}{d\varepsilon} > 0$ при $3\varepsilon - 2 > 0$.

$$\begin{aligned} \frac{d^2\Phi}{d\varepsilon^2} = & \frac{\alpha_3}{\varepsilon^2 \sqrt{3}} \cdot 4(1-z_1)^2 \left[\frac{1}{G_4} - \frac{1}{G_3} \right] + \frac{648 f_2^2 f_1^2}{[36 f_2^2 + f_1^2 (3\varepsilon - 2)^2]^2} [G_6 - z_1 G_5] + \\ & + \frac{108 f_1^2 (3\varepsilon - 2)^2}{[36 f_2^2 + f_1^2 (3\varepsilon - 2)^2]} \left[\frac{1}{G_6} - \frac{z_1}{G_5} \right] \end{aligned}$$

Так как $z_1 < 1$, $z_3 > 1$, то $\frac{d^2\Phi}{d\varepsilon^2} > 0$.

Следовательно, уравнение $\frac{d\Phi}{d\varepsilon} = 0$ имеет решение только в том случае, когда

$\frac{d\Phi(0)}{d\varepsilon} < 0$. В противном случае реализуется плоское деформированное состояние.

Дальнейшее исследование проведем в предположении малости толщины стенок капсулы $\left(\frac{R_3 - R_2}{R_2}\right) \ll 1$, так же считая, что сдвиговые свойства порошка оказывают меньшее влияние на процесс деформации системы, нежели объемные.

Обозначим $\Delta z_3 = z_3 - 1$. Тогда пренебрегая слагаемыми порядка Δz_3^2 , $\Delta \varepsilon^2$ и выше, а также слагаемыми порядка выше f_1^2 , уравнение $\frac{d\Phi}{d\varepsilon} = 0$ может быть представлено в виде:

$$\varepsilon \left[\frac{f_1^2}{2f_2} + \frac{1}{2} \alpha_3 \sqrt{3} \frac{\Delta z_3}{1-z_1} \right] = \frac{f_1^2}{3f_2} \cdot \frac{1-z_1}{z_1} - \alpha_1 z_1$$

Следовательно:

$$\varepsilon = g(\rho) \tag{23}$$

где $g(\rho) = \frac{2}{3}(1-z_1) \left(1-z_1 - \alpha_1 z_1 \frac{f_2}{f_1^2} \right) / \left(1-z_1 + \alpha_3 \sqrt{3} \Delta z_3 \frac{f_2}{f_1^2} \right)$ при $\alpha_1 < \frac{1-z_1}{z_1} \frac{f_1^2}{f_2}$;

$$g(\rho) = 0 \text{ при } \alpha_1 > \frac{1-z_1}{z_1} \frac{f_1^2}{f_2}.$$

Согласно (6, 21), имеем:

$$\frac{d\rho}{dt} = 2\rho \tag{24}$$

Найдем неизвестные функции, как функции плотности порошкового материала ρ .

Имеем, согласно (10, 23, 24):

$$\frac{dH}{d\rho} = -\frac{1}{2\rho} g(\rho) H \tag{25}$$

Решая уравнение (25), получаем:

$$H = H_0 \exp\left(-\int_{\rho_0}^{\rho} \frac{g(\rho)}{2\rho} d\rho\right) \quad (26)$$

Соотношение (26) представляет зависимость осевого размера вала от плотности. Для определения конечного размера верхний предел интеграла нужно положить равным единице.

В уравнение (23) входят параметры z_1 , z_3 , которые могут изменяться в процессе деформации и определяются через начальные значения и значения текущей плотности.

В силу условия несжимаемости вала, имеем:

$$R_1^2 H = R_{10}^2 H_0 \quad (27)$$

В силу условия несжимаемости капсулы:

$$(R_3^2 - R_2^2) H = (R_{30}^2 - R_{20}^2) H_0 \quad (28)$$

Из закона сохранения массы, следует:

$$\rho(R_2^2 - R_1^2) H = \rho_0(R_{20}^2 - R_{30}^2) H_0 \quad (29)$$

Из соотношений (27-29) следует:

$$z_1 = \frac{\rho z_{10}}{\rho z_{10} + \rho_0(1 - z_{10})} \quad (30)$$

$$z_3 = 1 + \frac{z_1}{z_{10}}(z_{30} - 1) \quad (31)$$

Заметим также, что при известном значении осевого размера H и плотности ρ соотношения (27-31) позволяют определить остальные геометрические размеры системы.

Таким образом, полученное в работе соотношение (26) представляет собой аналитическое соотношение, которое выражает осевой размер вала в зависимости от текущей относительной плотности порошкового материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочков, А.В. Особенности процесса уплотнения порошковых материалов в неоднородном нестационарном температурном поле / А.В. Бочков, В.А. Головешкин, Ю.М. Козырев, А.В. Пономарев, В.Н. Самаров // Механика композиционных материалов и конструкций. - Т.11. - № 3. - 2011. - С. 401-410.
2. Бочков, А.В. Особенности влияния неоднородного нестационарного температурного поля на процесс на процесс прессования труб / А.В. Бочков, В.А. Головешкин, А.Р. Пирумов, А.В. Пономарев, В.Н. Самаров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 6. - 2010. - С. 3-10.
3. Друянов, Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел /Б.А. Друянов. - М. : Машиностроение, 1989. - 164 с.
4. Грин, Р.Дж. Теория пластичности пористых тел / Р.Дж. Грин /Механика, 1973. - № 4. - С. 109-120.

Головешкин Василий Адамович

МГУПИ, г. Москва

Доктор технических наук, профессор

Тел. (495) 482-24-57, моб. 8-916-011-95-81

E-mail: nikshevolog@yandex.ru

Калугин Илья Анатольевич.

МГУПИ, г. Москва

Кандидат технических наук

Тел. (499) 269-58-10

E-mail: it1-mgapi@yandex.ru

Козырев Юрий Михайлович

МГУПИ, г. Москва

Аспирант

Тел. (499) 612-39-87

E-mail: it1-mgapi@yandex.ru

Пономарев Антон Васильевич

МГУПИ, г. Москва
Кандидат физико-математических наук, доцент
Тел. 8-926-162-64-22
E-mail: avpon@yandex.ru

Яблочко Сергей Викторович

ООО «НТЭ», г. Москва
Технический директор
Тел. (499) 269-58-10
E-mail: nikshevolog@yandex.ru

V.A. GOLOVESHKIN, I.A. KALUGIN, YU.M. KOZYREV,
A.V. PONOMAREV, S.V. YABLOCHKO

**EVALUATION OF BEAM AXIAL DEFORMATION UNDER
APPLICATION OF COATING FROM POWDERED MATERIAL**

In some cases of application of coatings from powdered material on a beam in a hot isostatic pressing (HIP) process a significant axial deformation takes place. Analytical estimations for values of such deformation are obtained.

Keywords: *irreversibly compressible material, yield criterion of Green.*

BIBLIOGRAPHY

1. Osobennosti processa uplotnenija poroshkovykh materialov v neodnorodnom nestacionarnom temperaturnom pole / A.V. Bochkov, V.A. Goloveshkin, Ju.M. Kozyrev, A.V. Ponomarev, V.N. Samarov // *Mehanika kompozicionnykh materialov i konstrukcij.* - T.11. - № 3. – 2011. - S. 401-410.
2. Osobennosti vlijaniya neodnorodnogo nestacionarnogo temperaturnogo polja na process na process pressovaniya trub / A.V. Bochkov, V.A. Goloveshkin, A.R. Pirumov, A.V. Ponomarev, V.N. Samarov // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii.* - № 6. – 2010. - S. 3-10.
3. Drujanov, B.A. *Prikladnaja teorija plastichnosti poristykh tel* /B.A. Drujanov. - M. : Mashinostroenie, 1989. – 164 s.
4. Grin, R.Dzh. *Teorija plastichnosti poristykh tel* / R.Dzh. Grin /*Mehanika*, 1973. - № 4. - S. 109-120.

Golovechkin Vasily Adamovich

Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science
Doctor of technical sciences, professor
107996, Moscow, Strominka, 20
Тел. (495) 482-24-57, моб. 8-916-011-95-81
E-mail: nikshevolog@yandex.ru

Kalugin Ilya Anatolievich.

Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science
Candidate of technical sciences
Тел. (499) 269-58-10
E-mail: it1-mgapi@yandex.ru

Kozyrev Yuri Mikhailovich

Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science
Post-graduate student
Тел. (499) 269-58-10
E-mail: it1-mgapi@yandex.ru

Ponomarev Anton Vasilyevich

Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science
Candidate of physico-mathematical Sciences, associate Professor of the chair, «Higher mathematics»
Тел. (499)161-28-34
E-mail: avpon@yandex.ru

Yablochko Sergey Viktorovich

NTE, Moscow
Technical Director
Тел. (499) 269-58-10
E-mail: nikshevolog@yandex.ru

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА О ЗАРОЖДЕНИИ ТРЕЩИНЫ В ВОЛОКНЕ ЛИНЕЙНО АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ СДВИГЕ

Предложена модель зарождения трещины продольного сдвига в волокне композита с периодической структурой, основанная на рассмотрении зоны трещинообразования. Считается, что зона трещинообразования представляет собой слой конечной длины, содержащий материал с частично нарушенными связями между отдельными структурными элементами. Анализ предельного равновесия зоны предразрушения (зоны ослабленных межчастичных связей материала) при продольном сдвиге выполняется на основе критерия предельного сдвига связей материала.

Ключевые слова: зарождение трещины продольного сдвига, композит, усилия в связях, продольный сдвиг.

Вопросы моделирования зарождения трещин в различных материалах и при различных условиях привлекают многих исследователей, например [1-3].

Рассмотрим антиплоскую деформацию неоднородного составного тела. Пусть имеется изотропная упругая плоскость (связующее), ослабленная периодической системой круглых отверстий, имеющих радиусы λ ($\lambda < 1$) и центры в точках $P_m = m\omega$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), $\omega = 2$.

Круговые отверстия связующего заполнены упругими шайбами (волокнами) из иного упругого материала и спаяны вдоль обвода. На составное тело (композит) действуют напряжениями $\tau_y = \tau_y^\infty$, $\tau_x = 0$ (продольный сдвиг на бесконечности). Рассматривается случай, когда трещинообразование может произойти в волокне.

Полагаем, что по мере возрастания интенсивности внешней нагрузки τ_y^∞ в сечении волокна образуется прослойка перенапряженного материала. Зона предразрушения в сечении волокна моделируется областью с ослабленными межчастичными связями в материале. Взаимодействие берегов этой области моделируется путем введения между берегами связей с заданной диаграммой деформирования.

В силу симметрии краевых условий и геометрии области D , занятой упругой средой, напряжения являются периодическими функциями с основными периодами ω . При деформации кусочно-однородного тела смежные точки контуров на границе раздела сред будут иметь одинаковые перемещения, а усилия, действующие со стороны связующего на любую шайбу (волокно), будут равны по величине и противоположны по знаку усилиям, действующим на связующее со стороны шайбы. Так как решение для связующего должно обладать свойством периодичности, то достаточно рассмотреть условия сопряжения связующего с шайбой лишь вдоль контура отверстия L_0 ($\tau = \lambda \exp(i\theta)$).

При действии внешней нагрузки τ_y^∞ на композит в связях, соединяющих берега зоны предразрушения в шайбе, возникают касательные усилия $q_y(x)$. Эти напряжения и размер зоны предразрушения заранее неизвестны и подлежат определению. Так как рассматриваемая задача механики разрушения о зарождении трещины в волокне сводится к решению однородного гармонического уравнения, то задача приводится к отысканию двух аналитических функций $f_s(z)$, $f_b(z)$ комплексного переменного $z = x + iy$ в области, занятой сечением композита.

Здесь через $f_b(z)$ обозначен комплексный потенциал волокна (включения), а через

$f_s(z)$ - потенциал связующего. Выражая напряжения и смещение через аналитическую функцию, граничные условия рассматриваемой задачи запишутся в следующем виде

$$f_s(\tau) + \overline{f_s(\tau)} = f_b(\tau) + \overline{f_b(\tau)} \quad (1)$$

$$\mu_s \frac{d}{ds} [f_s(\tau) - \overline{f_s(\tau)}] = \mu_b \frac{d}{ds} [f_b(\tau) - \overline{f_b(\tau)}]$$

$$f'_b(t) - \overline{f'_b(t)} = -2iq_y(t), \quad |t| \leq \ell \quad (2)$$

где $\tau = \lambda e^{i\theta} + m\omega$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$); t - аффикс точек берегов зоны предразрушения; μ_s и μ_b - модуль сдвига материала связующего и волокна соответственно.

Основные соотношения поставленной задачи должны быть дополнены соотношением, связывающим сдвиг берегов зоны предразрушения и касательные усилия в связях. Без потери общности это соотношение представим в виде

$$w_b^+(x, 0) - w_b^-(x, 0) = C(x, q_y(x)) q_y(x) \quad (3)$$

где функция $C(x, q_y(x))$ - эффективная податливость связей; $(w_b^+ - w_b^-)$ - сдвиг берегов зоны предразрушения в волокне.

После некоторых преобразований систему граничных условий (1) - (2) можно привести к следующему виду

$$\left(1 + \frac{\mu_b}{\mu_s}\right) f_b(\tau) + \left(1 - \frac{\mu_b}{\mu_s}\right) \overline{f_b(\tau)} = 2f_s(\tau) \quad (4)$$

$$f'_b(x) - \overline{f'_b(x)} = -2iq_y(x), \quad \text{при } y = 0, \quad |x| \leq \ell \quad (5)$$

Для нахождения предельной величины внешней нагрузки τ_y^∞ , при которой происходит зарождение трещины, постановку задачи необходимо дополнить критерием появления трещины. В качестве такого условия используем деформационный критерий разрушения. А именно, критерий критического сдвига берегов зоны предразрушения.

$$w^+ - w^- = \delta_{cr}, \quad (6)$$

где δ_{cr} - характеристика сопротивления волокна трещинообразованию.

Согласно условию (6), как только сдвиг берегов зоны предразрушения достигнет критического значения для данного материала произойдет появление трещины.

Решение краевой задачи (4) - (5) ищем в следующем виде

$$f_s(z) = f_1(z), \quad f'_1(z) = F_1(z) = \tau_y^\infty + \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \rho^{(2k)}(z)}{(2k+1)!} \quad (7)$$

$$f_b(z) = f_{1b}(z) + f_{2b}(z), \quad f_{1b}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} \frac{z^{2k+1}}{2k+1} \quad (8)$$

$$f_{2b}(z) = \frac{1}{\pi i} \int_{-\ell}^{\ell} \frac{g(t) dt}{t-z},$$

где $g(t)$ - искомая функция.

$$g(x) = \frac{\mu_b}{2} \frac{d}{dx} [w_b^+(x, 0) - w_b^-(x, 0)] \quad \text{на } |x| \leq \ell \quad (9)$$

К основным представлениям (7) - (9) следует добавить дополнительное условие, вытекающее из физического смысла задачи

$$\int_{-\ell}^{\ell} g(t) dt = 0 \quad (10)$$

Неизвестная функция $g(x)$ и постоянные a_{2k} , α_{2k} должны быть определены из граничных условий (4) – (5). Для составления уравнений относительно неизвестных коэффициентов a_{2k} представим граничное условие (4) в следующем виде

$$\left(1 + \frac{\mu_b}{\mu_s}\right) f_{1b}(\tau) + \left(1 - \frac{\mu_b}{\mu_t}\right) \overline{f_{1b}(\tau)} = 2f_s(\tau) + \varphi(\theta), \quad (11)$$

где

$$\varphi(\theta) = -\left(1 + \frac{\mu_b}{\mu_s}\right) f_{2b}(\tau) - \left(1 - \frac{\mu_b}{\mu_s}\right) \overline{f_{2b}(\tau)} \quad (12)$$

Относительно функции $\varphi(\theta)$ будем считать, что она разлагается на контуре $\tau = \lambda e^{i\theta}$ в ряд Фурье. Этот ряд имеет вид

$$\varphi(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_{2k} e^{2ki\theta}, \quad \text{Re } B_{2k} = 0 \quad (13)$$

$$B_{2k} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varphi(\theta) e^{-2ki\theta} d\theta \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

Подставив сюда функцию $\varphi(\theta)$ согласно (12) с учетом (8) и поменяв порядок интегрирования, после вычисления интегралов с помощью теории вычетов, находим

$$B_{2k} = -\frac{1}{\pi i} \int_{-\ell}^{\ell} g(t) f_{2k}(t) dt \quad (14)$$

$$f_0(t) = -\frac{1}{t}; \quad f_{2k}(t) = \left(1 - \frac{\mu_b}{\mu_s}\right) \frac{\lambda^{2k}}{(2k)! t^{2k}} + \left(1 + \frac{\mu_b}{\mu_s}\right) \frac{\lambda^{2k}}{(2k)! t^{2k}}$$

$$f_{-2k}(t) = -\left(1 - \frac{\mu_b}{\mu_s}\right) \frac{\lambda^{2k}}{2t^{2k+1}}$$

Подставив в граничное условие (11) вместо функций $f_{1b}(z)$, $f_1(z)$ разложения в ряды Лорана в окрестности нулевой точки, а вместо $f_{2b}(z)$ ряд Фурье и сравнивая коэффициенты при одинаковых степенях $\exp(i\theta)$, получаем совокупность бесконечных линейных алгебраических уравнений

$$\frac{1}{4} a_0 g_1 = \tau_y^\infty + \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_{2k+2} \lambda^{2k+2} r_{0,k} + \frac{B_0}{\lambda}, \quad (15)$$

$$\frac{\bar{a}_0}{4} g_2 = -\alpha_2,$$

$$\frac{1}{4} a_{2k} g_1 = \lambda^2 \alpha_{2k} r_{k,0} + \sum_{p=1}^{\infty} \alpha_{2p+2} \lambda^{2p+2} r_{p,k} + \frac{B_{2k}}{2\lambda^{2k+1}},$$

$$\frac{\bar{a}_{2k}}{4} \lambda^{2k} g_2 = -\alpha_{2k+2},$$

Здесь

$$g_1 = 2 \left(1 + \frac{\mu_b}{\mu_s}\right); \quad g_2 = 2 \left(1 - \frac{\mu_b}{\mu_s}\right)$$

$$r_{p,j} = \frac{(2p+2k+1)! g_{p+k+1}^*}{(2p)!(2k+1)! 2^{2p+2k+1}}; \quad r_{0,0} = 0; \quad g_{p+k+1}^* = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^{2(p+k+1)}}$$

Для определения неизвестной функции $g(x)$ в нашем распоряжении имеется граничное условие (5).

Требуя, чтобы функции (7) – (8) удовлетворяли граничному условию (5) на берегах зоны предразрушения, после некоторых выкладок, получаем сингулярное интегральное

уравнение относительно искомой функции $g(x)$:

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\ell}^{\ell} \frac{g(t)dt}{t-x} - \text{Im}[f'_{1b}(x)] = q_y(x) \quad |x| < \ell \quad (16)$$

Чтобы перейти к стандартному отрезку интегрирования $[-1, 1]$ сделаем замену переменных

$$x = \eta\ell, \quad t = \tau\ell$$

В результате преобразованное уравнение (16) принимает вид

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{g_*(\tau)d\tau}{\tau-\eta} - \text{Im}[f'_{1b}(\eta\ell)] = q_y(\eta) \quad (17)$$

Решение сингулярного интегрального уравнения представим в следующем виде

$$g_*(\eta) = \frac{g_0(\eta)}{\sqrt{1-\eta^2}}, \quad (18)$$

где функция $g_0(\eta)$ заменяется интерполяционным многочленом Лагранжа, построенным по чебышевским узлам.

Использование квадратурных формул [4, 5] позволяет свести интегральное уравнение (17) к конечной алгебраической системе уравнений относительно приближенных значений $g_*(\eta_k)$ искомой функции в узловых точках

$$\sum_{k=1}^n A_{m,k} g_{*k} - \frac{1}{2} \text{Im}[f'_{1b}(\eta_m)] = q_y(\eta_m) \quad (m = 1, 2, \dots, M-1) \quad (19)$$

Здесь
$$A_{m,k} = \frac{1}{2M} \left[\frac{1}{\sin \theta_m} \text{ctg} \frac{\theta_m + (-1)^{|m-k|} \theta_k}{2} \right], \quad g_*(\eta_k) = g_{*k}$$

К системе (19) необходимо добавить дополнительное уравнение (10), которое в дискретной форме принимает вид

$$\sum_{k=1}^M g_{*k} = 0 \quad (20)$$

В правую часть полученной системы (19) входят неизвестные значения касательных напряжений $q_y(\eta_m)$ в узловых точках, принадлежащих зоне предразрушения. Неизвестные касательные напряжения в связях $q_y(\eta_m)$ определяются из дополнительного условия (3). Используя полученное решение, имеем

$$g(x) = \frac{\mu_b}{2} \frac{d}{dx} [C(x, q_y(x)) q_y(x)] \quad (21)$$

Требую выполнения условий (21) в узловых точках, принадлежащих зоне предразрушения, получим еще одну систему из M уравнений для определения приближенных значений $q_y(\eta_m)$ ($m = 1, 2, \dots, M$). При этом используется метод конечных разностей.

$$\frac{4\ell}{\mu_b M} g(x_m) = C(x_{m+1}, q_{y,m+1}) q_{y,m+1} - C(x_{m-1}, q_{y,m-1}) q_{y,m-1} \quad (22)$$

$$q_{y,m} = q_y(\tau_m); \quad x_{m+1} = \ell \eta_{m+1}; \quad \tau_m = \cos \theta_m; \quad \eta_m = \cos \theta_m; \\ \theta_m = \frac{2m-1}{2M} \pi \quad (m = 1, 2, \dots, M)$$

Полученная система уравнений (19), (20), (22) является связанной с бесконечными системами (15), в которых вместо B_{2k} подставлена квадратурная формула

$$B_{2k} = -\frac{\ell}{M} \sum_{k=1}^M g_{*k} f_{2k}(\tau_k)$$

Так как в композите напряжения ограничены, то решение сингулярного интегрального уравнения следовало бы искать в классе всюду ограниченных функций (напряжений). Следовательно, к (19) – (20) следует добавить условия ограниченности напряжений у вершин зоны предразрушения (условия разрешимости краевой задачи в классе всюду ограниченных функций). Записывая это условие в дискретной форме, имеем

$$\sum_{k=1}^M (-1)^k g_{*k} \operatorname{ctg} \frac{\theta_k}{2} = 0 \quad (23)$$

Система уравнений (15), (19) – (20) полностью определяет решение поставленной задачи. Из-за того, что размер зоны предразрушения неизвестен, объединенная алгебраическая система уравнений (15), (19) – (20) является нелинейной даже при линейном законе деформирования связей. Для ее решения используется метод последовательных приближений.

В случае нелинейного закона деформирования связей при определении касательных напряжений в зоне предразрушения используется также итерационный алгоритм, подобный методу упругих решений [6]. Считается, что закон деформирования межчастичных связей в зоне предразрушения линейный при $w_b^+ - w_b^- \leq W_*$. Первый шаг итерационного процесса счета состоит в решении системы уравнений для линейно-упругих связей. Следующие итерации выполняются только в случае, если на части зоны предразрушения имеет место неравенство $w_b^+ - w_b^- > W_*$. Для таких итераций решается система уравнений в каждом приближении для квазиупругих связей с изменяющейся вдоль берегов зоны предразрушения и зависящей от величины касательных напряжений в связях эффективной податливости, которая вычислена на предыдущем шаге расчета. При этом расчет эффективной податливости проводился подобно определению секущего модуля в методе переменных параметров упругости [7].

В численных расчетах полагалось $\mu_b/\mu_s = 25$; $M = 30$, что соответствует разбиению интервала интегрирования на 30 чебышевских узлов. В результате численного расчета найдена зависимость длины зоны предразрушения, касательного напряжения в связях и сдвиг противоположных берегов зоны предразрушения от параметра нагружения τ_y^∞ .

Для нахождения предельно равновесного состояния зоны предразрушения, при котором появляется трещина в волокне, используем условие (6).

На основании полученного решения задачи нелинейной механики разрушения, условием, определяющим критическую внешнюю нагрузку, при которой в точке $x = x_0$ образуется трещина являются

$$C(x_0, q_y(x_0))q_y(x_0) = \delta_{cr} \quad (24)$$

Решение объединенной алгебраической системы (15), (19) – (20), (22), (23) и условия (24) позволяет найти критическое значение внешней нагрузки τ_y^∞ , размер зоны предразрушения и касательные напряжения в связях в состоянии предельного равновесия, при котором в волокне композита, образуется трещина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мустафаев, А.Б. Моделирование зарождения трещины в неравномерно нагретом цилиндре / А.Б. Мустафаев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2009. - № 4/276 (575). – С. 15 – 21.
2. Аллахвердиев, Р.А. Когезионная трещина в полосе (балке) / Р.А. Аллахвердиев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. -2010. - № 3 (281). – С. 3-6.
3. Степанов, Ю.С. Управление процессом гидроабразивного резания неметаллических материалов на основе изучения условий трещинообразования / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // *Известия Орловского государственного технического университета. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»* - № 1/265 (531). – 2007. – С. 98 – 93.

4. Мирсалимов, В.М. Неоднородные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов – М.: Наука, 1987. – 256 с.
5. Ladopoulos, E.G. Singular Integral Equations: Linear and Non-Linear Theory and its Applications in Science and Engineering. / E.G. Ladopoulos. – New York, Berlin: Springer. Verlag. 2000. – 547 с.
6. Ильюшин, А.А. Пластичность / А.А. Ильюшин. – М.: ЛОГОС – 2004. – 376 с.
7. Биргер, И.А. Общие алгоритмы решения задач теории упругости, пластичности, ползучести / И.А. Биргер / Успехи механики деформируемых сред. – М.: Наука, 1975. – С. 51 – 73.

Гасанов Фуад Фазиль оглы

Азербайджанский технический университет

Кандидат технических наук, доцент

тел. (+99455) 3509399

E-mail: hff74@mail.ru

F.F. HASANOV

**PERIODIC PROBLEM OF CRACK NUCLEATION IN THE FIBRE
OF LINEARLY REINFORCED COMPOSITES UNDER LONGITUDINAL
SHEAR**

The model of longitudinal shear crack nucleation in composite fibre with periodic structure, based on consideration of fracturing zone is offered. It is assumed, that the fracturing zone represents as finite length layer containing a material with in partially broken bonds between separate structural elements. The analysis of limiting equilibrium of prefracture zone (zone of the weakened interpartial bonds of the material) under longitudinal shear is carried out on the basis of limiting shear criterion of bonds of the material.

Keywords: *longitudinal shear crack nucleation, composite, tractions in bonds, longitudinal shear.*

BIBLIOGRAPHY

1. Mustafaev, A.B. Modelirovanie zarozhdenija treshhiny v neravnomerno nagretom cilindre / A.B. Mus-tafaev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2009. - № 4/276 (575). – S. 15 – 21.
2. Allahverdiev, R.A. Kogezionnaja treshhina v polose (balke) / R.A. Allahverdiev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. -2010. - № 3 (281). – S. 3-6.
3. Stepanov, Ju.S. Upravlenie processom gidroabrazivnogo rezanija nemetallicheskih materialov na os-nove izuchenija uslovij treshhinoobrazovaniya / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Miheev // Izvestija Orlov-skogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehni-ki i tehnologii» - № 1/265 (531). – 2007. – S. 98 – 93.
4. Mirsalimov, V.M. Neodnomernye uprugoplasticheskie zadachi /V.M. Mirsalimov – М.: Nauka, 1987. – 256 s.
5. Ladopoulos, E.G. Singular Integral Equations: Linear and Non-Linear Theory and its Applications in Science and Engineering. / E.G. Ladopoulos. – New York, Berlin: Springer. Verlag. 2000. – 547 s.
6. Il'jushin, A.A. Plastichnost' / A.A. Il'jushin. – М.: LOGOS – 2004. – 376 s.
7. Birger, I.A. Obshhie algoritmy resheniya zadach teorii uprugosti, plastichnosti, polzuchesti / I.A. Birger / Uspеhi mehaniki deformiruemyh sred. – М.: Nauka, 1975. – S. 51 – 73.

Hasanov Fuad Fazil oglu

Azerbaijan Technical University

Cand. of Tech. Sci., Assoc. Professor,

Tel. (+99455) 3509399

E-mail: hff74@mail.ru

Э.И. ЗУЛЬФУГАРОВ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ ИСКРИВЛЕННОЙ ТРЕЩИНЫ
В ТОРМОЗНОМ БАРАБАНЕ АВТОМОБИЛЯ**

Разработана расчетная модель, в рамках которой описывается трещинообразование в барабане тормозного механизма при торможении автомобиля. Исследуется влияние малых отклонений от прямолинейной формы зоны ослабленных межчастичных связей материала на зарождение трещины в барабане

Ключевые слова: *тормозной барабан автомобиля, искривленная зона предразрушения, трещинообразование при торможении.*

Фрикционная пара «барабан-накладка» грузовых автомобилей работает в условиях сложного напряженного состояния [1, 2]. Вопросам разрушения тормозного барабана при торможении колесной машины были посвящены работы [3, 4], а моделированию зарождения трещин при различных условиях - работы [5-8] и др. Важное значение имеет разработка расчетной модели, позволяющая прогнозировать напряженно-деформированное состояние в стадии предразрушения (образования трещин) в тормозном барабане. При повторно-кратковременном режиме торможения барабан тормозного механизма автомобиля испытывает многократное циклическое нагружение. Считается, что при этом в материале тормозного барабана будет возникать концентратор напряжений (область ослабленных межчастичных связей материала). При нагружении в нем (прослойки перенапряженного материала) образуется зона пластического течения. Пусть, для определенности, нагрузка изменяется так, что в области ослабленных межчастичных связей материала осуществляется пластическое деформирование. Через некоторое число циклов нагружений (торможений) возможность пластического деформирования в области ослабленных межчастичных связей материала исчерпывается, и раскрытие берегов полосы пластического течения резко возрастает. Если раскрытие берегов зоны предразрушения в точке максимальной концентрации достигает предельного значения δ_c для данного материала тормозного барабана, то в этой точке зарождается [9] трещина.

В процессе эксплуатации фрикционной пары «барабан-накладка» автомобиля в барабане будут возникать зоны предразрушения, которые моделируем как области ослабленных межчастичных связей материала. Взаимодействие берегов зоны предразрушения моделируется путем введения между ее берегами линий пластического скольжения (вырожденных полос пластических деформаций). Размеры зон пластического течения материала при постоянном напряжении зависят от вида материала. В реальных материалах, используемых для изготовления тормозных барабанов, из-за структурных и технологических факторов поверхности берегов зоны предразрушения имеют неровности и искривления.

Отнесем тормозной барабан к полярной системе координат r, θ , выбрав начало координат в центре концентрических окружностей L_0, L с радиусами R_0 и R . Считается, что внутренний контур барабана близок к круглому. Рассмотрим некоторую произвольную реализацию шероховатости внутренней поверхности тормозного барабана.

Представим границу внутреннего контура L' в виде

$$\rho(\theta) = R + \varepsilon H(\theta),$$

где $\varepsilon = R_{\max}/R$ – малый параметр; R_{\max} – наибольшая высота выступа (впадины) неровности внутренней поверхности тормозного барабана; $H(\theta)$ – функция, не зависящая от малого параметра.

Рассмотрим задачу о зарождении дефекта типа трещины в барабане тормозного механизма предполагая, что контур зоны предразрушения имеет шероховатость (малые отклоне-

ния от прямолинейной формы). Зона предразрушения, образующая в процессе эксплуатации фрикционной пары, считается близкой к прямолинейной форме, допуская лишь малые отклонения линии зоны от прямой $y_1 = 0$. Уравнение линии зоны предразрушения принимается в виде

$$y_1 = f_1(x_1), \quad |x_1| \leq \ell_1.$$

Размер зоны предразрушения заранее неизвестен и должен быть определен в процессе решения задачи. На основании принятого допущения о форме линии зоны предразрушения функции $f_1(x_1)$ и $f_1'(x_1)$ являются малые величины.

Так как область предразрушения (прослойка «перенапряженного» материала) мала по сравнению с остальной частью тормозного барабана, ее можно мысленно удалить, заменив разрезом, поверхности которых взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала. В исследуемом случае возникновение дефекта типа трещины представляет собой процесс перехода области предразрушения в область разорванных связей между поверхностями материала барабана.

Считаем, что зона предразрушения ориентирована в направлении действия максимальных растягивающих напряжений, возникающих в тормозном барабане. В центре зоны предразрушения разместим начало локальной системы координат $x_1 O_1 y_1$, ось x_1 которой совпадает с линией зоны и образует угол α_1 с осью Ox ($\theta = 0$).

Считается, что в начальной стадии образования зоны предразрушения, их размер гораздо меньше толщины барабана.

При торможении автомобиля под действием контактного давления $p(\theta)$ и сил трения на барабан в связях, соединяющих берега зоны предразрушения, будут возникать нормальные σ_s и касательные τ_s напряжения.

Граничные условия задачи о напряженном состоянии на внутреннем и внешнем контурах барабана при торможении автомобиля будут иметь вид

$$\begin{aligned} \sigma_n = -p(\theta); \quad \tau_{nt} = -fp(\theta) & \quad \text{при } r = \rho(\theta) \quad \text{на площадке контакта} \\ \sigma_n = 0; \quad \tau_{nt} = 0 & \quad \text{вне площадки контакта} \\ \sigma_r = 0; \quad \tau_{r\theta} = 0 & \quad \text{при } r = R_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где f – коэффициент трения фрикционной пары.

На берегах зоны предразрушения граничные условия имеют вид

$$\sigma_{y_1} = \sigma_s; \quad \tau_{x_1 y_1} = \tau_s \quad (2)$$

Граничные условия на берегах зоны предразрушения представим в виде [10]

$$\begin{aligned} -\sigma_n^+ = \sigma_n^- = \sigma_{y_1} \cos^2 \theta_1 + \sigma_{x_1} \sin^2 \theta_1 - 2\tau_{x_1 y_1} \sin \theta_1 \cos \theta_1; \\ -\tau_{nt}^+ = \tau_{nt}^- = (\sigma_{y_1} - \sigma_{x_1}) \sin \theta_1 \cos \theta_1 + \tau_{x_1 y_1} (\cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_1), \end{aligned}$$

где «+» соответствует верхнему берегу зоны предразрушения, «-» – нижнему берегу зоны предразрушения; θ_1 – угол, отсчитываемый против часовой стрелки от оси $O_1 y_1$ к внешней нормали n верхнего или нижнего берега зоны предразрушения.

Так как функции $f_1(x_1)$ и $f_1'(x_1)$ являются малыми величинами, то функцию $f_1(x_1)$ можно представить в виде

$$f_1(x_1) = \varepsilon_1 H_1(x_1) \quad |x_1| \leq \ell_1,$$

где ε_1 – малый параметр.

Напряжения и перемещения в тормозном барабане ищем в виде разложений по малым параметрам, в которых пренебрегаем, для упрощения, членами, содержащими ε и ε_1 степени выше первой. Применяя метод возмущений, находим последовательность следующих граничных задач:

в нулевом – нулевом приближении

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(0,0)} &= -p^{(0)}(\theta); \quad \tau_{r\theta}^{(0,0)} = -fp^{(0)}(\theta) \quad \text{при } r = R \text{ на площадке контакта} \\ \sigma_r^{(0,0)} &= 0; \quad \tau_{r\theta}^{(0,0)} = 0 \quad \text{вне площадки контакта} \\ \sigma_r^{(0,0)} &= 0; \quad \tau_{r\theta}^{(0,0)} = 0 \quad \text{при } r = R_0 \\ \sigma_{y_1}^{(0,0)} &= \sigma_s; \quad \tau_{x_1y_1}^{(0,0)} = \tau_s \quad \text{при } y_1 = 0, \quad |x_1| \leq \ell_1^0 \end{aligned} \quad (3)$$

в первом – нулевом приближении

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(1,0)} &= N - p^{(1)}(\theta); \quad \tau_{r\theta}^{(1,0)} = T - fp^{(1)}(\theta) \quad \text{при } r = R \text{ на площадке контакта} \\ \sigma_r^{(1,0)} &= N; \quad \tau_{r\theta}^{(1,0)} = T \quad \text{вне площадки контакта} \\ \sigma_r^{(1,0)} &= 0; \quad \tau_{r\theta}^{(1,0)} = 0 \quad \text{при } r = R_0 \\ \sigma_{y_1}^{(1,0)} &= 0; \quad \tau_{x_1y_1}^{(1,0)} = 0 \quad \text{при } y_1 = 0, \quad |x_1| \leq \ell_1^1 \end{aligned} \quad (4)$$

в первом – первом приближении

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(1,1)} &= 0; \quad \tau_{r\theta}^{(1,1)} = 0 \quad \text{при } r = R \\ \sigma_r^{(1,1)} &= 0; \quad \tau_{r\theta}^{(1,1)} = 0 \quad \text{при } r = R_0 \\ \sigma_{y_1}^{(1,1)} &= N_1; \quad \tau_{x_1y_1}^{(1,1)} = T_1 \quad \text{при } y_1 = 0, \quad |x_1| \leq \bar{\ell}_1 \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь величины N, T, N_1, T_1 находятся по следующим формулам

$$\begin{aligned} N &= -H(\theta) \frac{\partial \sigma_r^{(0,0)}}{\partial r} + 2\tau_{r\theta}^{(0,0)} \frac{1}{R} \frac{dH(\theta)}{d\theta} \quad \text{при } r = R \\ T &= (\sigma_\theta^{(0,0)} - \sigma_r^{(0,0)}) \frac{1}{R} \frac{dH(\theta)}{d\theta} - H(\theta) \frac{\partial \tau_{r\theta}^{(0,0)}}{\partial r} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} N_1 &= 2\tau_{x_1y_1}^{(0,0)} \frac{dH_1(x_1)}{dx_1} - H_1 \frac{\partial \sigma_{y_1}^{(0,0)}}{\partial y_1} \quad \text{при } y_1 = 0 \\ T_1 &= (\sigma_{x_1}^{(0,0)} - \sigma_{y_1}^{(0,0)}) \frac{dH_1}{dx_1} - H_1 \frac{\partial \tau_{x_1y_1}^{(0,0)}}{\partial y_1} \end{aligned} \quad (7)$$

При получении краевых условий было учтено, что $\ell_1 = \ell_1^0 + \varepsilon \ell_1^1 + \varepsilon_1 \bar{\ell}_1 + \dots$

Используя формулы Колосова–Мухелишвили [10] граничные условия задачи в каждом приближении можно записать в виде краевой задачи для отыскания двух аналитических функций $\Phi(z)$ и $\Psi(z)$.

Комплексные потенциалы, описывающие напряженно-деформированное состояние в нулевом – нулевом состоянии ищем в виде [6, 7]:

$$\Phi^{(0,0)}(z) = \Phi_0^{(0,0)}(z) + \Phi_1^{(0,0)}(z) + \Phi_2^{(0,0)}(z); \quad z = x + iy \quad (8)$$

$$\Psi^{(0,0)}(z) = \Psi_0^{(0,0)}(z) + \Psi_1^{(0,0)}(z) + \Psi_2^{(0,0)}(z)$$

Здесь
$$\Phi_0^{(0,0)}(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k z^k; \quad \Psi_0^{(0,0)}(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k z^k \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Phi_1^{(0,0)}(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} \frac{g_1^0(t) dt}{t - z_1}; \quad \Psi_1^{(0,0)}(z) = \frac{1}{2\pi} e^{-2i\alpha_1} \int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} \left[\frac{\overline{g_1^0(t)}}{t - z_1} - \frac{\overline{T_1} g_1^0(t) e^{i\alpha_1}}{(t - z_1)^2} \right] dt; \\ \Phi_2^{(0,0)}(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} \left\{ \left(\frac{1}{z\overline{T_1} - 1} + \frac{1}{2} \right) \overline{T_1} e^{i\alpha_1} g_1^0(t) + \left[\frac{\overline{T_1}}{2} - \frac{z^2 \overline{T_1} - 2z + T_1}{(z\overline{T_1} - 1)^2} \right] e^{-i\alpha_1} \overline{g_1^0(t)} \right\} dt \quad (10) \\ \Psi_2^{(0,0)}(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} \left[\frac{e^{i\alpha_1} \overline{T_1}^3}{(z\overline{T_1} - 1)^2} g_1^0(t) + (z^2 \overline{T_1}^2 + 4 - 3z\overline{T_1} + zT_1 \overline{T_1}^2 - 3T_1 \overline{T_1}) \times \right. \\ &\quad \left. \times \frac{\overline{T_1} e^{-i\alpha_1}}{(z\overline{T_1} - 1)^3} \overline{g_1^0(t)} \right] dt; \end{aligned}$$

$g_1^0(t)$ – искомая функция, характеризующая раскрытие берегов зоны предразрушения

$$g_1^{(0)}(x_1) = \frac{2G}{i(1 + \kappa_0)} \frac{\partial}{\partial x_1} \left[u_1^+(x_1, 0) - u_1^-(x_1, 0) + i(v_1^+(x_1, 0) - v_1^-(x_1, 0)) \right]$$

$T_1 = te^{i\alpha_1} + z_1^0$; $z_1 = e^{-i\alpha_1}(z - z_1^0)$; G – модуль сдвига материала барабана; $\kappa_0 = 3 - 4\mu$; μ – коэффициент Пуассона материала барабана.

Удовлетворяя функциями (8) краевым условиям (3) на берегах зоны предразрушения, после некоторых преобразований, получим комплексное сингулярное интегральное уравнение относительно неизвестной функции $g_1^{(0)}(x_1)$:

$$\int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} \left[R(t, x) g_1^{(0)}(t) + S(t, x) \overline{g_1^{(0)}(t)} \right] dt = \pi f^0(x), \quad |x| \leq \ell_1^0, \quad (11)$$

где
$$f^0(x) = -(\sigma_s - i\tau_s) - \left[\Phi_0^{(0,0)}(x) + \overline{\Phi_0^{(0,0)}(x)} + x\overline{\Phi_0^{(0,0)'}}(x) + \overline{\Psi_0^{(0,0)}}(x) \right].$$

К сингулярному интегральному уравнению для внутренней зоны предразрушения необходимо добавить дополнительное равенство

$$\int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} g_1^{(0)}(t) dt = 0, \quad (12)$$

обеспечивающее однозначность перемещений при обходе контура зоны предразрушения.

Удовлетворяя краевым условиям (3), записанных через комплексные потенциалы, функциями (8), получаем после некоторых преобразований бесконечную линейную систему

алгебраических уравнений относительно коэффициентов a_k , b_k функций $\Phi_0^{(0,0)}(z)$ и $\Psi_0^{(0,0)}(z)$.

Ввиду некоторой громоздкости система алгебраических уравнений не приводится. В правую часть этой системы входят интегралы от искомых функций $g_1^{(0)}(x_1)$. Применяя процедуру алгебраизации [11, 12], комплексное сингулярное интегральное уравнение сведем к системе M алгебраических уравнений относительно значений искомой функции $g_1^{(0)}(t_m)$ ($m = 1, 2, \dots, M$) в чебышевских узлах.

Для замкнутости полученных алгебраических уравнений не хватает двух уравнений, определяющих размеры зоны предразрушения. Условиями, служащими для определения размеров зоны предразрушения, являются условия конечности напряжений в вершинах зоны предразрушения. Записывая условия конечности напряжений для каждой вершины зоны предразрушения, находим еще два недостающих уравнения в следующем виде:

$$\sum_{m=1}^M (-1)^m g_1^{(0)}(t_m) \operatorname{ctg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0; \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^M (-1)^{M+m} g_1^{(0)}(t_m) \operatorname{tg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0.$$

После решения объединенной алгебраической системы перейдем к построению решения задачи в первом–нулевом приближении. На основании полученного решения находим компоненты напряжений $\sigma_r^{(0,0)}$, $\sigma_\theta^{(0,0)}$, $\tau_{r\theta}^{(0,0)}$, $\sigma_{x_1}^{(0,0)}$, $\sigma_{y_1}^{(0,0)}$, $\sigma_{x_1 y_1}^{(0,0)}$ в тормозном барабане в нулевом – нулевом приближении. При $r = R$ находим функции N и T , а при $y_1 = 0$ функции N_1 и T_1 .

Граничные условия задачи (4) для отыскания напряженного состояния в первом – нулевом приближении с помощью формул Колосова-Мухелишвили можно записать в виде краевой задачи для комплексных потенциалов $\Phi^{(1,0)}(z)$ и $\Psi^{(1,0)}(z)$. Комплексные потенциалы $\Phi^{(1,0)}(z)$ и $\Psi^{(1,0)}(z)$ ищутся в виде аналогично (8) с очевидными изменениями. Дальнейший ход решения задачи такой же, как в нулевом – нулевом приближении.

Аналогично задача решается в первом – первом приближении.

После нахождения искомых величин для прогнозирования предельного состояния барабана тормозного механизма автомобиля, когда может появиться трещина, использовали критерий критического раскрытия берегов зоны предразрушения

$$\left| (u_1^+ - u_1^-) - i(v_1^+ - v_1^-) \right| = \delta_c, \quad (14)$$

где δ_c – характеристика трещиностойкости материала барабана, определяемая опытным путем.

Используя полученное решение, условие, определяющее предельное значение нагрузки, при которой появится трещина, представим в виде

$$\frac{1 + \kappa_0}{2G} \frac{\pi \ell_1}{M} \sqrt{A^2 + B^2} = \delta_c, \quad (15)$$

где $A = \sum_{m=1}^{M_1} \left[\nu_1^{(0,0)}(t_m) + \varepsilon \nu_1^{(1,0)}(t_m) + \varepsilon_1 \nu_1^{(1,1)}(t_m) \right]$,

$$B = \sum_{m=1}^{M_1} \left[u_1^{(0,0)}(t_m) + \varepsilon u_1^{(1,0)}(t_m) + \varepsilon_1 u_1^{(1,1)}(t_m) \right]$$

M_1 – число узловых точек в отрезке $(-\ell_1, x_0)$.

Совместное решение полученных уравнений с критерием (15) позволяет при заданных характеристиках материала барабана определить критическую величину внешней нагрузки (контактного давления тормозного механизма) и размер зоны предразрушения для состояния предельного равновесия. Совершенно аналогично рассматривается случай, когда зона предразрушения выходит одним концом на внешнюю или внутреннюю поверхность барабана. При этом необходимость в условии типа (12) в каждом приближении отпадает. Для поверхностной зоны предразрушения условие типа (12) заменяется на условие конечности напряжений на крае, выходящим на поверхность $r = R$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, Л.Л. Конструктивная безопасность автомобиля / Л.Л.Афанасьев, А.Б. Дьяков, В.А. Илларионов – М.: Машиностроение, 1983. –212 с.
2. Вольченко, В.И. Барабанно-колодочные тормозные устройства / В.И. Вольченко, Ю.С. Замора. – Львов: Вища школа, 1980. –161 с.
3. Гейдаров, Ш.Г. Исследование дефектов в тормозном барабане автомобиля / Ш.Г. Гейдаров // Ученые записки АЗГУ. - Т. VIII. - № 2. – 1999. – С. 171 – 175.
4. Гейдаров, Ш.Г. Предельно-равновесное состояние тормозного барабана при наличии малых трещин в момент торможения автомобиля / Ш.Г. Гейдаров // Динамика и прочность механических систем. - Баку: Элм. – 1997. – С. 13 – 27.
5. Степанов, Ю.С. Моделирование условий зарождения трещины в хрупкой пластине при сверхзвуковом взаимодействии с абразивной частицей /Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Известия Орловского государственного технического университета. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.. - 2007. - № 3. - С. 86 - 91.
6. Гасанов, Ш.Г. Пластические деформации у края трещины, выходящей на границу раздела сред /Ш.Г. Гасанов // Известия Орловского государственного технического университета. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» - № 1/269 (544). – 2008. – С. 29 – 32.
7. Степанов, Ю.С. Управление процессом гидроабразивного резания неметаллических материалов на основе изучения условий трещинообразования / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Известия Орловского государственного технического университета. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» - № 1/265 (531). – 2007. – С. 98 – 93.
8. Степанов, Ю.С. Разрушение преграды сверхзвуковым потоком свободных абразивных частиц / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев. – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 152 с.
9. Мирсалимов, В.М. Зарождение дефекта типа трещины во втулке контактной пары / В.М. Мирсалимов // Математическое моделирование. – 2005. - Т. 17. – С. 35 – 45.
10. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. –707 с.
11. Саврук, М.П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами / М.П. Саврук. –Киев: Наукова думка, 1981. – 324 с.
12. Мирсалимов, В.М. Неодномерные упругопластические задачи /В.М. Мирсалимов. – М.: Наука, 1987. – 256 с.

Зульфугаров Эльчин Иззетали оглы

Азербайджанский технический университет, г. Баку

Аспирант

тел. (+99450) 3207566

E-mail: sopromat_v@mail.ru

E.I. ZULFUGAROV

MODELLING OF CURVED CRACK NUCLEATION IN AUTOMOBILE BRAKE DRUM

The model of crack nucleation in brake mechanism drum at automobile braking is developed. Effect of small deviations from the rectilinear form of zone of weakened interpartial bonds of the material on crack nucleation in the drum is investigated.

Keywords: *automobile brake drum, curved prefracture zone, fracturing at braking.*

BIBLIOGRAPHY

1. Afanas'ev, L.L. Konstruktivnaja bezopasnost' avtomobilja / L.L.Afanas'ev, A.B. D'jakov, V.A. Illa-rionov – M.: Mashinostroenie, 1983. –212 s.
2. Vol'chenko, V.I. Barabanno-kolodochnye tormoznye ustrojstva / V.I. Vol'chenko, Ju.S. Zamora. – L'vov: Vishha shkola, 1980. –161 s.
3. Gejdarov, Sh.G. Issledovanie defektov v tormoznom barabane avtomobilja / Sh.G. Gejdarov // Uchenye zapiski AzTU. - T. VIII. - № 2. – 1999. – S. 171 – 175.
4. Gejdarov, Sh.G. Predel'no-ravnesnoe sostojanie tormoznogo barabana pri nalichii malyh treshhin v moment tormozhenija avtomobilja / Sh.G. Gejdarov // Dinamika i prochnost' mehanicheskikh sistem. - Baku: Jel'm. – 1997. – S. 13 – 27.
5. Stepanov, Ju.S. Modelirovanie uslovij zarozhdenija treshhiny v hrupkoj plastine pri sverhzvukovom vzaimodejstvie s abrazivnoj chasticej / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Miheev // Izvestija Orlovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - 2007. - № 3. - S. 86 – 91.
6. Gasanov, Sh.G. Plasticheskie deformacii u kraja treshhiny, vyhodjashhej na granicu razdela sred /Sh.G. Gasanov // Izvestija Orlovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii» - № 1/269 (544). – 2008. – S. 29 – 32.
7. Stepanov, Ju.S. Upravlenie processom gidroabrazivnogo rezanija nemetallicheskih materialov na osnove izuchenija uslovij treshhinoobrazovanija / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Miheev // Izvestija Orlovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii» - № 1/265 (531). – 2007. – S. 98 – 93.
8. Stepanov, Ju.S. Razrushenie pregrady sverhzvukovym potokom svobodnyh abrazivnyh chastic /Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Miheev. – M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2010. – 152 s.
9. Mirsalimov, V.M. Zarozhdenie defekta tipa treshhiny vo vtulke kontaktnoj pary / V.M. Mirsalimov // Matematicheskoe modelirovanie. – 2005. - T. 17. – S. 35 – 45.
10. Mushelishvili, N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoj teorii uprugosti / N.I. Mushelishvili. – M.: Nauka, 1966. –707 s.
11. Savruk, M.P. Dvumernye zadachi uprugosti dlja tel s treshhinami / M.P. Savruk. –Kiev: Naukova dumka, 1981. – 324 s.
12. Mirsalimov, V.M. Neodnomernye uprugoplasticheskie zadachi /V.M. Mirsalimov.–M.: Nauka, 1987.– 256 s.

Zulfugarov Elchin Izzatali oglu

Azerbaijan Technical University, Baku

Postgraduate student

t. (+99450) 3207566

E-mail: sopromat_v@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 637.631.002.64(075)

К.С. ГАЛАТОВ

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ СТЕРЖНЯ КУРИНОГО ПЕРА РИФЛЕННЫМ ВАЛКОМ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В статье с помощью регрессионного анализа исследуется процесс прокатки стержня куриного пера рифленным валком на плоской поверхности. По полученной модели определены рациональные конструктивные параметры рифлёного валка. Проведенные исследования могут быть использованы для конструирования рабочих органов узлов механической деформации сортировочных машин.

Ключевые слова: рифлёный валок, факторы, показатель Fill Power, регрессионная модель.

В России основным поставщиком натурального сырья для лёгкой промышленности является сельское хозяйство. К одному из видов натурального сырья относятся перо и пух птицы.

Для расширения ассортимета швейных изделий с куриным пером целесообразно применять механическую деформацию стержня, заключающаяся в его прокатке между парой валков [1], или в прокатке рифленным валком на подающей транспортерной ленте [2-4].

В работе [5] определена величина рационального диаметра рифленого валка, осуществляющего процесс прокатки стержня куриного пера на плоскости поверхности.

Эффективность механической деформации обеспечивается рациональными параметрами рабочего органа – рифлёного валка, определение которых является актуальной задачей. Решение данной задачи целесообразно осуществлять с помощью регрессионного анализа.

В качестве параметра оптимизации процесса прокатки стержня пера рифленным валком на плоской поверхности, будем использовать показатель Fill Power (F.P.) перовой массы, состоящей из деформированных перьев. Показатель F.P. характеризует свойство перопухового сырья занимать определенный объем при стандартной нагрузке.

В общем случае факторами, оказывающими влияние на F.P. перовой массы, составленной из деформированных рифленным валком перьев, являются параметры этого валка: высота рифлей; шаг рифления; ширина вершины рифли, угол профиля рифли, диаметр вершин рифлей, радиус закругления впадины между рифлями, радиус закругления вершины рифли (рис. 1), а также сила давления на стержень пера при прокатке, определяемая зазором между вершиной рифли и контактной поверхностью.

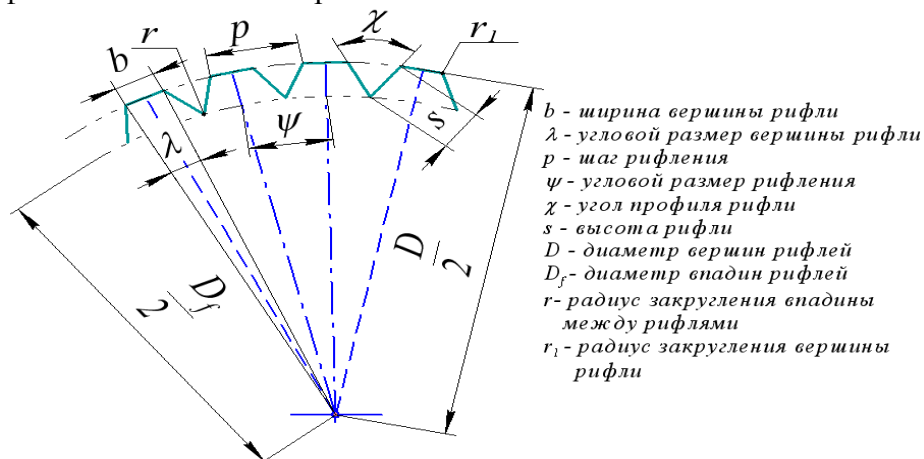


Рисунок 1 – Конструктивные параметры рифленого валка

В результате анализа объекта исследования и его факторного пространства в качестве параметра оптимизации процесса прокатки рифленным валком на плоской поверхности будем рассматривать показатель *F.P.* перовой массы, состоящей из деформированных рифленных валком перьев; при этом значимые факторы: шаг рифления; ширина вершины рифли; зазор между вершиной рифли и плоской поверхностью.

Физическое моделирование процесса прокатки стержня пера рифленным валком на плоской поверхности требует создания экспериментальной установки. В соответствии с выбором параметра оптимизации и варьируемых факторов была разработана и изготовлена лабораторная установка, внешний вид и схема которой приведена на рисунке 2.



1 – микровинт; 2 – основание;
3 – рифленный валок; 4 – электродвигатель;
5 – блок питания; 6 – контактная поверхность.

Рисунок 2 – Лабораторная установка для деформации стержня

Данная установка состоит из привода с валом, на котором устанавливались сменные рифленные валки. Величина давления на стержень пера определяется величиной зазора, в котором происходит его деформация при прокатке на опорной плоской поверхности, которая перемещается с помощью микровинта с лимбом (цена деления 0,01 мм). Опорная плоская поверхность обработана шлифованием со степенью точности $R_a 0,63$ мкм.

Для разработки регрессионной модели процесса прокатки стержня пера рифленным валком на плоской поверхности был проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ). Выбранным ранее параметру оптимизации и значимым факторам присвоим следующие обозначения: показатель *F.P.* перовой массы – Y ; шаг рифления – p ; ширина вершины рифли – b ; зазор между вершиной рифли и контактной поверхностью – h .

Линейная модель (полином первой степени) не является адекватной экспериментальным исследованиям, в соответствии с этим будем рассматривать модель в виде полинома второй степени

$$f_1(\bar{X}; \bar{\beta}) = \beta_0 + \beta_1 p + \beta_2 b + \beta_3 h + \beta_4 p^2 + \beta_5 b^2 + \beta_6 h^2 + \beta_7 p b + \beta_8 p h + \beta_9 b h. \quad (1)$$

Для построения плана эксперимента необходимо выбрать *основной уровень* и *интервалы варьирования* управляющих параметров p, b, h .

На основании результатов известных исследований [1] и анализа процесса механической деформации стержня куриного пера путем прокатки рифленным валком выбраны следующие области варьирования значимых факторов, мм: $2 \leq p \leq 4$; $0,25 \leq b \leq 1$; $0,04 \leq h \leq 0,06$. Уровни и интервалы варьирования факторов в кодированных и в соответствующих им реальных переменных представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни варьирования			Интервалы варьирования, I_i
	-1	0	1	
p – шаг рифления, мм	2	3	4	1
b – ширина вершины рифли, мм	0,25	0,625	1	0,375
h – зазор между вершиной рифли и поверхн., мм	0,04	0,05	0,06	0,01

В соответствии с полученными уровнями варьирования факторов были изготовлены рифленые валки необходимых конструктивных параметров (см. рис. 3).

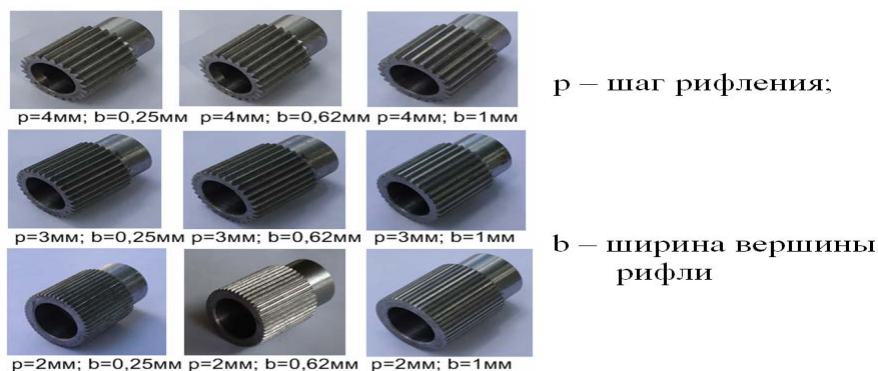


Рисунок 3 – Параметры сменных рифленых валков

Для проведения и статистической обработки экспериментальных данных выбираем центральное рототабельное композиционное планирование (РЦКП) по плану Бокса-Уилсона, как наиболее отвечающее специфике решаемой задачи [6].

Для проведения эксперимента отобрали 23 навески среднего покровного пера (от 3 до 9,5 см) по 3 грамма. Взвешивание навесок производилось на электронных весах ВСП-0,5/0,1-1 (3-ий класс точности по ГОСТ 29329 – 92). Они предназначены для статических измерений массы грузов при учетных и технологических операциях в промышленности, сельском хозяйстве и в быту в диапазоне от 0,5 г до 500 г с погрешностью $\pm 0,05$ г (таблица 1).

Для каждого из 23-х опытов использовался рифленый валок с требуемыми конструктивными параметрами и с помощью микровинта с лимбом выставлялся соответствующий зазор между вершиной рифли и опорной плоской поверхностью. Величину зазора контролировали измерительным щупом (ТУ 2-034-225), для необходимой корректировки использовали лимб микровинта. В каждом опыте частота вращения рабочего органа оставалась неизменной и равной 57 мин^{-1} [7]. Величину показателя Ф.Р. перовой массы определяли на компактном приборе до и после прокатки рифленым валком.

В соответствии с матрицей планирования при помощи пакета прикладных математических программ Maple 9.5 была рассчитана регрессионная модель в кодированных переменных

$$y = 179,473 + 0,437x_1 - 2,125x_2 - 0,875x_3 - 13,914x_1^2 - 2,164x_2^2 - 9,664x_3^2 - 4,75x_1x_2 + 4,25x_1x_3 - 3,333x_2x_3. \quad (3)$$

Осуществляем проверку модели (3) на адекватность эксперименту по критерию Фишера [6].

Найдем значение статистики критерия Фишера: $F_{\text{набл}} = 143,524$.

Табличное значение критерия на уровне значимости $\alpha = 0,05$ и при степенях свободы $k_1 = 3$, $k_2 = 19$ равно $F_{(\alpha=0,05;3;19)} = 3,59$.

Табличное значение критерия на уровне значимости $\alpha = 0,01$ и при $k_1 = 3$, $k_2 = 19$

Таблица 2 – Матрица планирования РЦКП после рандомизации в кодированных переменных и результаты эксперимента после прокатки

№ опыта	x ₁	x ₂	x ₃	Параметр оптимизации Y
13	–	–	–	148
4	–	–	+	150
3	–	+	–	165
19	–	+	+	147
21	+	–	–	155
8	+	–	+	170
5	+	+	–	147
2	+	+	+	147
23	0	–	–	169
15	0	–	+	168
9	0	+	–	170
12	0	+	+	164
16	–	0	–	161
22	–	0	+	148
1	+	0	–	154
20	+	0	+	161
7	–	–	0	166
17	–	+	0	165
14	+	–	0	168
6	+	+	0	155
10	0	0	0	179
11	0	0	0	180
18	0	0	0	179

равно $F_{(\alpha=0.01;3;19)} = 6,22$. Так как $F_{\text{набл}} > F_{(\alpha;k_1;k_2)}$ в обоих случаях, то гипотеза о квадратичной зависимости между факторами Y и p, b, h значима как на уровне $\alpha = 0.05$, так и на уровне $\alpha = 0.01$, то есть гипотеза о модельной зависимости (3) принимается как правдоподобная.

Проверим теперь гипотезы о значимости каждого из коэффициентов $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_9$ модельной зависимости (3.10), где проверка проводится по t – критерию Стьюдента [6]. Для проверки гипотезы о значимости коэффициента β_i построим симметричный относительно нуля доверительный интервал с правой границей:

$$\Delta_Y = \frac{t(\alpha; n - m - 1) Q_{e,Y}}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

где $t(\alpha; n - m - 1)$ критическая точка распределения Стьюдента на уровне значимости α при $(n - m - 1)$ степенях свободы.

Если модуль коэффициента β_i больше Δ_Y , то согласно правилу проверки гипотезы коэффициент β_i является значимым для модели (3) то есть влияние слагаемого в (3), содержащего коэффициент β_i существенно для модели. В противном случае (если $\beta_i \leq \Delta_Y$) коэффициент β_i является незначимым и влиянием соответствующего слагаемого модели можно пренебречь.

На уровне значимости $\alpha = 0,05$ при $n - m - 1 = 19$ вычисляем по таблице критических точек распределения Стьюдента значение: $t(\alpha = 0,05; 19) = 2,093$.

Находим правую границу доверительного интервала по формуле (7): $\Delta_Y = 4,53$.

Сравнивая модули коэффициентов модели (3) со значением Δ_Y приходим к выводу, что статистически значимыми факторами являются все три фактора.

Найдем теперь зависимость параметра оптимизации от значимых факторов модели в реальных переменных. Для этого сделаем обратные преобразования к (2)

$$p = x_1 + 3; b = 0,375x_2 + 0,625; h = 0,02x_3 + 0,05. \quad (8)$$

Пользуясь формулами (8), с помощью пакета Maple 9.5 получим зависимость в виде

$$Y = -13,519 - 13,914p^2 - 15,391b^2 - 24161,184h^2 + 81,216p + 73,795b + 2012,646h - 12,667pb - 444,444bh + 212,5hp. \quad (9)$$

Учтем незначимые факторы модели. В кодированных переменных с учетом статистически незначимых факторов получим уравнение

$$y = 179,473 - 13,914x_1^2 - 9,664x_3^2 - 4,75x_1x_2 + 4,25x_1x_3 - 3,333x_2x_3. \quad (10)$$

В кодированных переменных значения параметров в точке оптимума равны:

$$x_1 = 0,16, x_2 = -0,77, x_3 = 0,12.$$

В реальных переменных соответственно уравнение искомой регрессионной зависимости можно представить в виде

$$Y = -13,519 - 13,914p^2 - 15,391b^2 - 24161,184h^2 - 444,444bh + 212,5hp - 12,667pb. \quad (11)$$

В реальных переменных значения параметров в точке оптимума равны:

$$p = 3,165 \text{ мм}; b = 0,337 \text{ мм}; h = 0,052 \text{ мм}.$$

Таким образом, из модели (10) следует, что коэффициенты перед выражениями, x_1^2, x_3^2, x_1x_2 значимы, а, следовательно, значимы и все три фактора x_1, x_2, x_3 . На основании регрессионных зависимостей построены трехмерные изображения поверхности отклика при фиксированных значениях факторов (рис. 4).

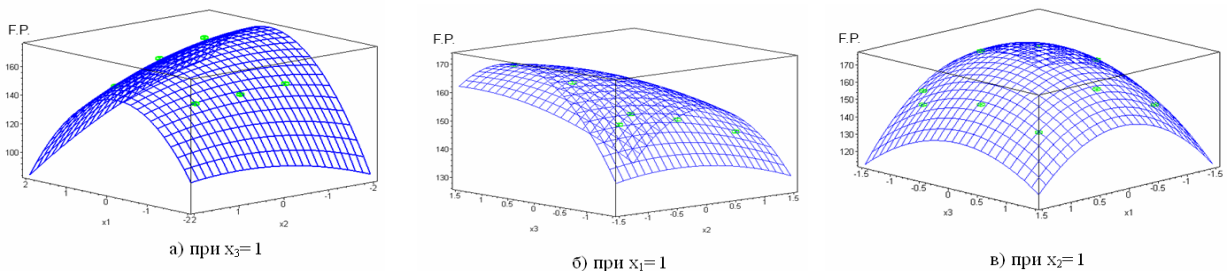


Рисунок 4 – Зависимости F.P. от

- а) ширины вершины рифли (x_2) и шага рифления (x_1);
- б) ширины вершины рифли (x_2) и зазора между вершиной рифли и контактной поверхностью (x_3);
- в) шага рифления (x_1) и зазора между вершиной рифли и контактной поверхностью (x_3)

Графическая интерпретация оптимума регрессионной модели, полученной в результате исследования модели с помощью программы Maple 9.5, показано на рисунке 5.

С помощью проведенных исследований получена регрессионной модели процесса механической деформации стержня куриного пера при прокатке рифленным валком на плоской поверхности. По данной модели определены рациональные конструктивные параметры рифлёного валка: шаг рифления – 3,2 мм; ширина вершины рифли – 0,3 мм; зазор между вершиной рифли и контактной поверхностью – 0,05 мм.

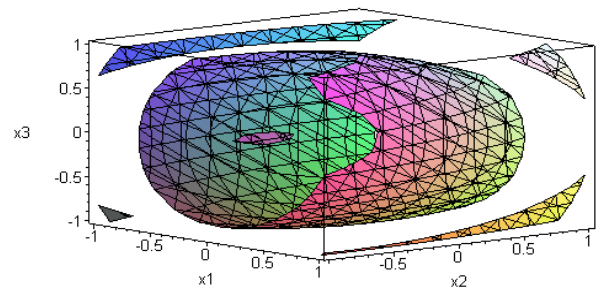


Рисунок 5 – Графическая интерпретация оптимума регрессионной модели

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соприкина, Т.Н. Перспективы применения куриного пера в изделиях швейной промышленности / Т.Н. Соприкина, И.Ю. Бринк, Ю.Е. Чертов // Швейная промышленность. - 2007. - № 4. - С. 53–54.
2. Пат. 2346885 РФ, МПК⁸ В68G 3/08. Устройство механической модификации куриного пера / И.Ю. Бринк, Т.Н. Соприкина, Ю. Е. Чертов; № 2007108628/12; заявл. 21.05.2007; Оpubл. 20.02.2009. Бюл. № 5. - 2 с.
3. Пат. 2366767 РФ, МПК⁸ В68G 3/08. Устройство для сортировки куриного пера / Ю.Е. Чертов, К.С. Галатов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ЮРГУЭС». № 2008113670/12; заявл. 07.04.2008; Оpubл. 10.09.2009. - Бюл. № 25. - 2 с.
4. Пат. 2424384 РФ, МПК⁸ В68G 3/08. Устройство сортировки перо-пухового сырья на фракции / Ю. Е., Чертов, К.С. Галатов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ЮРГУЭС». № 2010102611/05; заявл. 26.01.2011; Оpubл. 20.07.2011. - Бюл. № 20. - 2 с.
5. Галатов, К.С. Определение параметров рабочего органа узла модификации пера сортировочных машин / К.С. Галатов, Ю.Е. Чертов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. –2012. – № 1. - С. 48-51.
6. Горев, В.В. Математическое моделирование при расчетах и исследованиях строительных конструкций / В.В. Горев. – М.: Высшая школа. – 2002. – 206 с.
7. Чертов, Ю.Е. Повышение эффективности модификации стержня пера птицы / Ю.Е. Чертов, К.С. Галатов // Птица и птицепродукты. –2012. – № 6. - С. 60-62.

Галатов Кирилл Станиславович

ФГБОУ ВПО «Институт сферы обслуживания и предпринимательства», (филиал) ДГТУ
аспирант кафедры «Прикладная механика и конструирование машин»
346530, г. Шахты, пер. Спортивный, 19
Тел. моб. 8-950-843-69-33
E-mail: galatov_kira@mail.ru

K.S. GALATOV

**REGRESSION MODEL OF PROCESS PROSKATING RINKS OF THE
CORE OF THE CHICKEN FEATHER CORRUGATED ROLLER
ON THE FLAT SURFACE**

The article by regression analysis examines the rolling operation the rod chicken pen corrugated rolls on a flat surface. According to the resulting model is a rational design parameters corrugated roller. The research can be used to construct the working bodies of the units of mechanical deformation of sorting machines.

Keywords: corrugated roller, factors, indicator Fill Power, regression model.

BIBLIOGRAPHY

1. Soprikina, T.N. Perspektivy primeneniya kurinogo pera v izdelijah shvejnoj promyshlennosti // T.N. Soprikina, I. Ju Brink, Ju. E. Chertov. Shvejnoja promyshlennost. 2007. №4. S 53–54.
2. Pat. 2346885 Ru, МПК⁸ В68G 3/08. Ustroystvo mehanicheskoy modifikacii kurinogo pera / Brink I.Ju., Soprikina T.N., Chertov Ju. E.; № 2007108628/12; zajavleno 21.05.2007; Opublikovano 20.02.2009. Bjul. №5. 2 s.
3. Pat. 2366767 Ru, МПК⁸ В68G 3/08. Ustroystvo dlya sortirovki kurinogo pera / Chertov Ju. E., Galatov K.S. № 2008113670/12; zajavleno 07.04.2008; Opublikovano 10.09.2009. Bjul. №25. 2 s.
4. Pat. 2424384 Ru, МПК⁸ В68G 3/08. Ustroystvo sortirovki pero-puhovogo syrja na frakcii / Chertov Ju. E., Galatov K.S. № 2010102611/05; zajavleno 26.01.2011; Opublikovano 20.07.2011. Bjul. № 20. 2 s.
5. Galatov, K.S. Opredelenie parametrov rabocheho organa uzla modifikacii pera sortirovochnih mashin / Galatov K.S., Ju. E. Chertov // Fundamentalnii i prikladnii problemi tehnikii i tehnologii. –2012. – №1. S. 48-51.
6. Gorev, V.V. Matematicheskoe modelirovanie pri raschetah i issledovanijah stroitelnih konstrukcii / V.V. Gorev. – М.: Vishaja shkola. – 2002. – 206 s.
7. Chertov, Ju. E. Povishenie jeffektivnosti modifikacii sterzhnja pera ptici. Ju. E. Chertov, K.S. Galatov // Ptica i pticeprodukti. –2012. – № 6. - S. - 60-62.

Galatov Kiril Stanislavovich

Institute of sphere of service and business, (branch) DSTU
post-graduate student of department «The applied mechanics and designing of machines»
346530, Shakhty, Lane Sportivny,19
Phone: 8-950-843-69-33
E-mail: galatov_kira@mail.ru

УДК 621.646.98

Е.В. ПЛАХОТНИКОВА, В. Б. ПРОТАСЬЕВ

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ «ЭЛЕКТРОПРИВОД – ЗАПОРНАЯ АРМАТУРА» ПУТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОГЛАСОВАННОСТИ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье приведены теоретические и экспериментальные обоснования, подтверждающие отсутствие согласованности электродинамических систем «электропривод – запорная арматура», приводящей к значительным отклонениям фактических электродинамических моментов системы от требований, прописанных в технической документации. Предложен метод устранения рассогласования системы путем учета гарантированной электродинамической поправки и обеспечения требований герметичности запорной арматуры, за счет использования энергии аккумулируемой электроприводом.

Ключевые слова: *качество электродинамических систем, согласованность, функциональная совместимость, электропривод, запорная арматура*

Теоретические и экспериментальные исследования электродинамических систем «электропривод - запорная арматура» представленные в работах [1, 2], позволили выявить ряд существенных недостатков снижающих качество и конкурентоспособность отечественных систем данного типа: необоснованно завышенные силовые характеристики, в результате некорректного назначения параметров настройки электроприводов $M_{н.зак}$ без учета электродинамической поправки $\Delta_{эл.дин}$; рассогласование по статическим и динамическим параметрам, приводящее к значительному отклонению необходимого крутящего момента для герметичного перекрытия трубопровода и электродинамического крутящего момента $M_{эл.дин}$ (фактического крутящего момента) развиваемого системой.

Основными причинами указанных недостатков, является нарушение при проектировании рассматриваемых систем общесистемных принципов [3] совместимости и согласованности, что препятствует обеспечению эффективного функционирования электропривода и запорной арматуры в рамках единой электродинамической системы.

Устранить перечисленные недостатки без существенных затрат можно за счет введения электродинамической поправки $\Delta_{эл.дин}$, значение которой зависит от характеристик электропривода (частоты вращения выходного вала), времени запаздывания системы управления на отключение, инерции системы, а так же электродинамической податливости запорной арматуры [2].

Внесение электродинамической поправки увеличивает согласованность входных и выходных параметров системы, снижая величину крутящего момента настройки электропривода $M_{н.зак}$, что позволяет существенно снизить нагрузки, возникающие в запорной арматуре под действием электропривода и, в ряде случаев, произвести замену электроприводов рекомендуемых в ТУ на запорную арматуру, на менее мощные и менее дорогостоящие конструкции.

Для пояснения приведем графики (рис. 1), построенные по результатам экспериментальных исследований электродинамических систем, в которых управление одним и тем же запорным клапаном НГ 26526-065АЭ по ТУ 26-07-1407-2008 («Корпорация Сплав» г. Великий Новгород) осуществлялось различными электроприводами: SA 10.2 -14 (частота вращения выходного вала электропривода $n_{SA10.2-14} = 32$ об/мин) - система I и SA 10.2 – 16 (частота вращения выходного вала электропривода $n_{SA10.2-16} = 63$ об/мин) - система II.

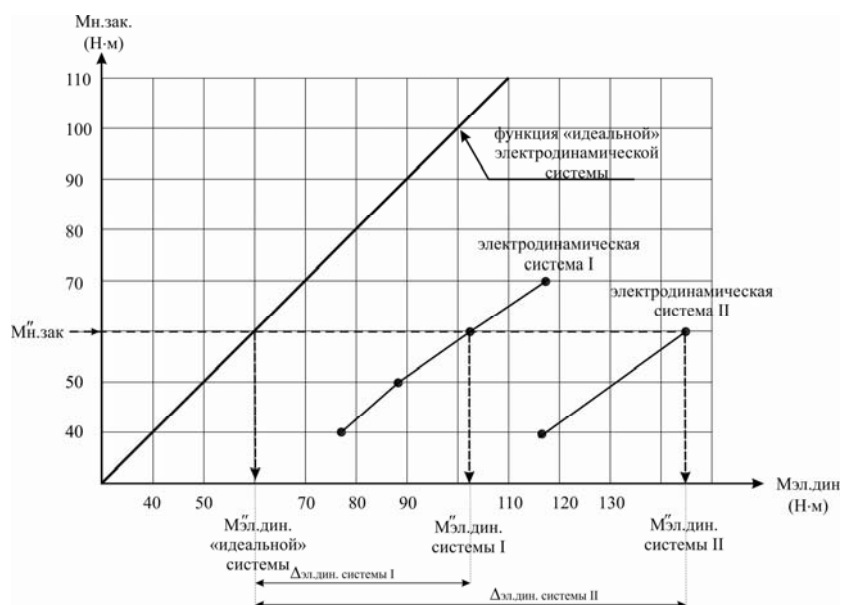


Рисунок 1 – Значения электродинамических моментов при различных настройках электропривода на отключение при давлении среды на клапан $P_N=0\text{МПа}$

Сдвиг графиков (системы I и II) относительно выбранной базы – графика «идеальной» системы при функционировании которой обеспечивается полная согласованность входных и выходных характеристик ($M_{\text{эл.дин}} = M_{\text{н.зак}}$) соответствует значениям электродинамических поправок $\Delta_{\text{эл.дин. системы } i}$.

Из графиков видно, что величина электродинамической поправки пропорциональна частоте вращения электропривода (см. рис. 1):

$$M''_{\text{эл.дин. системы II}} / M''_{\text{эл.дин. системы I}} \approx \Delta_{\text{эл.дин. системы II}} / \Delta_{\text{эл.дин. системы I}} \approx n_{\text{SA10.2-16}} / n_{\text{SA10.2-14}} \approx 2.$$

Таким образом, путем увеличения частоты вращения выходного вала электропривода, что обеспечивает рост электродинамического момента, можно не только снизить время запираания трубопровода, но и при условии учета электродинамической поправки уменьшить крутящий момент настройки электропривода на отключение $M_{\text{н.зак}}$.

Значение крутящего момента настройки электропривода на отключение $M_{\text{н.зак}}$ играет решающую роль при выборе типа управляющего устройства (электропривода), т.к. при объединении электропривода и запорной арматуры в единую электродинамическую систему, определяет их функциональную совместимость [5].

Для пояснения рассмотрим упрощенный алгоритм выбора электропривода для управления запорной арматурой, используемый в настоящее время.

Назначение управляющего устройства (электропривода) начинается с расчета силовых характеристик запорной арматуры в соответствии с известными методиками, алгоритм которых изложен к примеру в СТ ЦКБА 002-2003 «Арматура трубопроводная. Задвижки. Методика силового расчета» [6]. Существенным недостатком указанных методик является их ориентация на статические зависимости, в соответствии с которыми и определяется значение максимального крутящего момента на выходном валу электропривода, принятое в настоящее время как момент настройки электропривода на отключение $M_{\text{н.зак}}$.

Далее в соответствии с номенклатурными каталогами производителей электроприводов, осуществляется выбор типоразмера электропривода, по диапазону регулирования муфты крутящего момента. Для пояснения, электроприводы с пределами регулирования муфты ограничения крутящего момента от 20 до 60 Н·м, используются для управления арматурой, силовые характеристики которой ($M_{\text{н.зак}}$) находятся в указанных пределах.

Затем, в соответствии с требованиями по быстродействию арматуры тип привода уточняется в рамках типоразмерного ряда. Для тихоходной арматуры, где время совершения выходным звеном хода при нагрузке существенное, выбирается электропривод с низкой ча-

стотой вращения выходного органа (11-16 об/мин) для быстродействующей арматуры с высоким (22-90 об/мин).

Именно в таком порядке и обеспечивается функциональная совместимость двух элементов: запорная арматура и электропривод, которые при условии соблюдения остальных показателей качества подробно представленных в ГОСТ Р 53674 – 2009 «Арматура трубопроводная. Номенклатура показателей. Опросные листы для проектирования и заказа» [4], должны составить эффективную электродинамическую систему.

Основываясь на ранее проведенных исследованиях [1, 2] можно утверждать что, существующий подход к обеспечению функциональной совместимости на основе статических зависимостей снижает качество и конкурентоспособность отечественной продукции данного типа.

Для устранения перечисленных недостатков и корректного обеспечения функциональной совместимости электропривода и запорной арматуры в рамках единой электродинамической системы можно предложить использование экспериментально-графического метода, разработанного авторами.

Суть метода заключается в устранении внутренней рассогласованности элементов системы, путем использования аккумулированной электроприводом энергии в период задержки электродвигателя при отключении и энергии инерции останавливающегося электродвигателя.

Технический результат предлагаемого метода достигается за счет учета на стадии проектирования электродинамических систем гарантированной электродинамической поправки, учитывающей жесткость запорного клапана и частоту вращения электропривода. Для пояснения предлагаемого метода приведем ряд зависимостей.

Значение электродинамического момента $M_{эл.дин}$ можно определить как [2]:

$$M_{эл.дин} = M_{н.зак} + \Delta M_3 + \Delta M_J \quad (1)$$

где $M_{н.зак}$ – величина крутящего момента, заданная при настройке на отключение электропривода; ΔM_3 – приращение крутящего момента за время запаздывания системы управления на отключение электродвигателя (время запаздывания обусловлено токовременными характеристиками элементов, задействованных при отключении электродвигателя: контакторы, силовые разъединители, микропереключатели и т.д.); ΔM_J – приращение крутящего момента за счет энергии инерции подвижных элементов системы после отключения электродвигателя до полной остановки системы.

Для обеспечения согласованности электродинамических систем необходимо максимально сблизить значения электродинамического момента $M_{эл.дин}$ и крутящего момента закрытия обеспечивающего герметичное перекрытие трубопровода $M_{кр.зак}$, величину которого определяют путем статического расчета запорной арматуры [6] и подтверждают испытаниями на герметичность [7].

Для этого, на стадии силового расчета с учетом требуемого быстродействия запорной арматуры необходимо учесть гарантированное значение электродинамической поправки.

Значение полной электродинамической поправки $\Delta_{эл.дин}$ отдельно взятой системы можно рассчитать по следующей зависимости [2]:

$$\Delta_{эл.дин} = \Delta M_3 + \Delta M_J \quad (2)$$

Величина ΔM_3 , с достаточной точностью может быть определена на стадии силового расчета:

$$\Delta M_3 = \text{tg} \beta \cdot n_{эл.дин.зап} \cdot t_{зап} \cdot 360 \quad (3)$$

где $\text{tg} \beta$ - является постоянной величиной, для отдельно взятой конструкции запорной арматуры зависящей от ее жесткости; $n_{эл.дин.зап}$ - частота вращения выходного вала электропривода в период запаздывания системы на отключение, определяемая требуемым быстродействием запорной арматуры (данное значение на стадии силового расчета можно принять равным номинальному значению при условии, что время запаздывания системы управления минимально); $t_{зап}$ – время запаздывания системы управления (мин).

Для нахождения величины второй составляющей ΔM_J необходимо определить приведенный момент инерции системы, что требует привязки к конкретному типу электропривода.

На стадии силового расчета до назначения параметров системы осуществить данную задачу невозможно. Кроме этого необходимо учитывать, что работа совершаемая силами инерции является случайной величиной и ее точное определение возможно только при многократных стендовых испытаниях.

Таким образом, значению гарантированной электродинамической поправки будет соответствовать значение ΔM_3 .

Для пояснения предлагаемого метода рассмотрим графики (рис. 2) построенные для электродинамической системы включающей рассматриваемый ранее запорный клапан НГ 26526-065АЭ-43 с различными сочетаниями управляющих элементов.

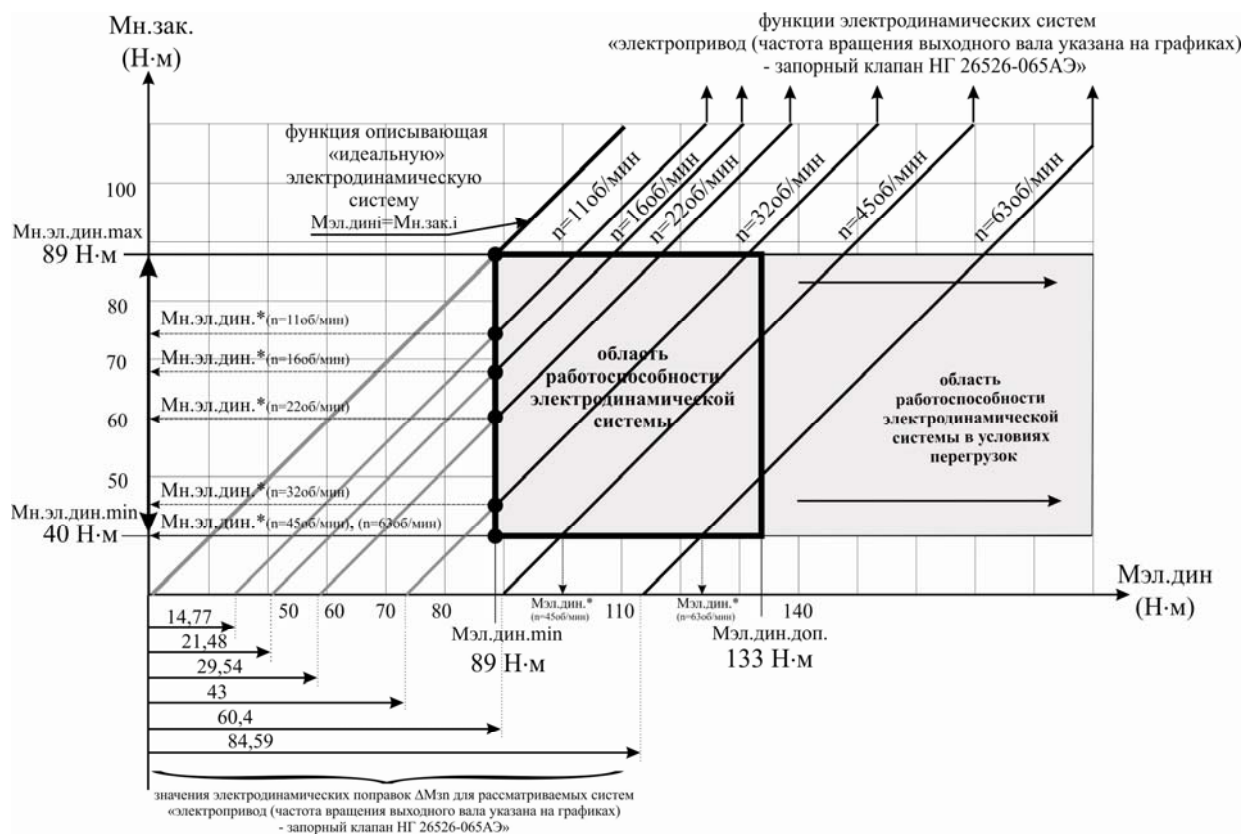


Рисунок 2 – Учет гарантированной электродинамической поправки при назначении параметров настройки электродинамических систем, в состав которых входит клапан запорный НГ 26526-065АЭ-43 при заданном давлении среды на клапан 2,5 МПа

Для построения графиков первично экспериментально было определено значение электродинамического момента ($M_{эл.дин.эк.} = 103 \text{ Н·м}$) на установке включающей: клапан запорный НГ 26526-065АЭ-43; электропривод SA 10.2 -14 (частота вращения выходного вала электропривода 32 об/мин ($n_{эк.} = 32 \text{ об/мин}$)), крутящий момент настройки на отключение 60 Н·м ($M_{н.эк.} = 60 \text{ Н·м}$) и электронный блок управления AUMATIC AC 01.2 Non-intrusive (время запаздывания на отключение 20 мс ($\Delta t_{эк.} = 20 \text{ мс}$)).

Учитывая линейный характер приращения электродинамического момента в зоне упругой деформации [1] жесткость запорной арматуры можно определить в соответствии с полученными экспериментальными данными при использовании следующей зависимости:

$$\text{tg}\beta = M_{эл.дин.эк.} - M_{н.эк.} / \varphi_3 - \varphi_1 = M_{эл.дин.эк.} - M_{н.эк.} / (n_{эк.} \cdot \Delta t_{эк.} \cdot 10^{-3}) / 60) \cdot 360 \quad (4)$$

где $M_{эл.дин.эк.}$ – электродинамический момент зафиксированный в результате эксперимента (Н·м); $M_{н.эк.}$ – момент настройки на отключение электропривода, заданный при проведении эксперимента (Н·м); $n_{эк.}$ – число оборотов выходного вала электропривода, используемого при эксперименте (об/мин); $\Delta t_{эк.}$ – время задержки экспериментальной системы (мс).

Для клапана запорного НГ 26526-065АЭ-43 данная величина составила 11,19 Н·м.

Далее при различных вариациях частот вращения выходного вала электроприводов: 11, 16, 22, 32, 45, 63 об/мин по формуле (3) были рассчитаны гарантированные значения электродинамических поправок ΔM_3 при минимальном времени запаздывания системы управления на отключение соответствующем 20 мс.

В соответствии с полученными значениями построены графики, описывающие изменения электродинамических крутящих моментов при заданных частотах вращения выходного вала электропривода (см. рис. 2).

Для определения значений крутящих моментов настройки электродинамических систем с различной частотой вращения выходного вала электропривода в соответствии с номенклатурным каталогом [8] было определено значение величины крутящего момента на уплотнение в состоянии «закрыто» $M_{кр.зак}$, необходимое для обеспечения герметичного перекрытия трубопровода. Данная величина для запорного клапана НГ 26526-065АЭ-43 составила 89 Н·м.

С целью обеспечения согласованности системы величина $M_{кр.зак}$ была принята в качестве минимального значения электродинамического момента системы $M_{эл.дин.мин}$ и отражена на графике вертикальной линией.

Точки пересечения графиков изменения электродинамических крутящих моментов при заданных частотах вращения электропривода с вертикальной линией $M_{эл.дин.мин}$ и будут соответствовать необходимым значениям настройки электроприводов различной частоты вращения на отключение $M_{н.эл.дин.*}$ по которым в дальнейшем можно подобрать тип электропривода с учетом предела регулирования муфты ограничения крутящего момента. При этом обеспечение герметичности запорного клапана НГ 26526-065АЭ-43 будет происходить за счет энергии аккумуляруемой приводом в период запаздывания системы при отключении.

Очевидно, что для корректного использования представленного метода необходимо ввести ограничения, в совокупности позволяющие обеспечить работоспособность электродинамической системы «электропривод – запорная арматура»:

- величина крутящего момента настройки системы на отключение с учетом электродинамической поправки не должна превышать значение крутящего момента на уплотнение $M_{кр.зак}$, т.е. при назначении параметров настройки необходимо учитывать условие ($M_{н.эл.дин.мах} = M_{кр.зак}$);

- значение электродинамического момента развиваемого системой при заданных настройках на отключение, с учетом электродинамической поправки, не должно быть ниже значения соответствующего крутящего момента на уплотнение $M_{кр.зак}$, т.е. здесь необходимо учитывать условие ($M_{эл.дин.мин} = M_{кр.зак}$) необходимое для обеспечения требуемой герметичности;

- электропривод должен обеспечить перемещение запорного органа арматуры из положения «открыто» в положение «закрыто» и в обратном направлении, т.е. здесь необходимо соблюдать условие, при котором крутящий момент, заданный при настройке электропривода на отключение с учетом электродинамической поправки не должен быть ниже крутящего момента холостого хода ($M_{н.эл.дин.мин} = M_{хх}$).

Таким образом, работоспособность системы будет обеспечена, если настройка системы на отключение будут производиться в пределах от $M_{н.эл.дин.мин}$ до $M_{н.эл.дин.мах}$ и при этом, за счет электродинамических возможностей рассматриваемых систем, значения необходимого для герметичного перекрытия крутящего момента будут достигнуты, т.е. $M_{эл.дин.мин} \geq M_{кр.зак}$.

Следует понимать, что обеспечение полной согласованности входных и выходных параметров электродинамических систем путем корректировки параметров настройки электропривода на отключение, является почти нереализуемой задачей. Как отмечалось ранее инерционная, составляющая электродинамической поправки ΔM_j имеет неустойчивый характер. Таким, образом, при определении зоны работоспособности электродинамических систем целесообразно учесть вероятность возникновения повышенных крутящих моментов даже после внесения электродинамических поправок.

С учетом, заложенного при проектировании запорной арматуры запаса по прочности, позволяющего гарантировано выдержать 50% превышение крутящего момента при совместном функционировании запорной арматуры и электропривода, для дополнительного ограни-

чения области, в рамках которой система способна сохранять свою работоспособность, необходимо произвести расчет допустимого значения электродинамического момента системы $M_{эл.дин.доп}$, который можно осуществить по следующей зависимости:

$$M_{эл.дин.доп} = 1,5 \cdot M_{кр.зак}. \quad (5)$$

Определение значений крутящих моментов настройки электропривода для различных вариаций частоты вращения выходного вала $M_{н.эл.дин.}$ (см. рис. 2) позволяет перейти к выбору типа электропривода по диапазону регулирования муфты ограничения крутящего момента.

Осуществим данный этап на примере электроприводов ЭПАС (ООО «Сплав – Привод» г. Великий Новгород), отчасти потому, что электроприводы данного производителя прописаны в номенклатурном каталоге рассматриваемого запорного клапана [8] в качестве управляющего устройства, что в дальнейшем позволит оценить эффективность предлагаемого метода.

Для упрощения пределы регулирования муфты ограничения крутящего момента электроприводов ЭПАС сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Пределы регулирования муфты ограничения крутящего момента электроприводов ЭПАС производитель ООО «Сплав – Привод»

Типоразмер электропривода ЭПАС	Пределы регулирования муфты крутящего момента от $M_{кр.мин}$ до $M_{кр.макс}$, (Н·м)
ЭПАС-07.1	10-30
ЭПАС-07.5	20-60
ЭПАС-10.1	40-120
ЭПАС-14.1	100-250
ЭПАС-14.5	200-500
ЭПАС-16.1	400-1000

Детализация применимости указанных электроприводов в качестве управляющих устройств запорного клапана НГ26526-065АЭ, в соответствии с установленными значениями крутящих моментов настройки электроприводов на отключение (см. рис. 2) и в зависимости от частоты вращения выходного вала электропривода представлена в таблице 2.

Таблица 2 - Типы электроприводов ЭПАС предварительно выбранные для управления запорным клапаном НГ 26526-065АЭ с учетом электродинамической поправки

Число оборотов выходного вала n, об/мин	Давление среды на клапан P, МПа	Крутящий момент настройки электропривода $M_{н.эл.дин.}$, Н·м	Тип электроприв. ЭПАС с указанием мощности электродвигателя N, кВт	Пусковой крутящий момент при номинальном напряжении $M_{пуск}$, Н·м
11	2.5	74,23	ЭПАС-10.1 (0,18 кВт)	195
16		67,52	ЭПАС-10.1 (0,37 кВт)	234
22		59,46	ЭПАС-07.5 (0,18кВт)	112
32		46	ЭПАС-07.5 (0,37 кВт)	135
45		40	ЭПАС-07.5 (0,37 кВт)	115

Значения пусковых крутящих моментов при номинальном напряжении $M_{пуск}$ (Н·м) указаны в таблице (см. табл. 2) с целью оценки возможности выбранных конструкций электроприводов обеспечить срыв запорного клапана из крайнего положения «закрыто», при соответствующих значениях электродинамических моментов (рис. 2). Учитывая, что значения пусковых моментов (табл. 2) выше электродинамических моментов (рис. 2) можно утверждать - во всех сочетаниях электроприводы позволят обеспечивать функциональное назначение клапана НГ 26526-065АЭ.

Для оценки эффективности представленного метода сопоставим характеристики электроприводов назначенных с учетом гарантированной электродинамической поправки и без нее, приняв за основу данные указанные в номенклатурном каталоге [8] (табл. 3).

Таблица 3 - Характеристики электроприводов назначенных в качестве управляющих устройств запорного клапана НГ 26526-065АЭ в соответствии с ТУ 26-07-1407-2008 и путем учета гарантированной электродинамической поправки

Давление среды, МПа	Число оборотов выходного вала, об/мин	Без учета электродинамической поправки по ТУ 26-07-1407-2008		С учетом электродинамической поправки (см. табл. 2)	
		Величина крутящего момента на-стройки электро-привода, Н·м	Тип электроприв. ЭПАС с указанием мощности электродвиг N, кВт	Величина крутящего момента настройки электропривода, Н·м	Тип электроприв. ЭПАС с указанием мощности электродвиг N, кВт
2,5	16	89	ЭПАС 10.1 -12 D (0,37 кВт)	67	ЭПАС 10.1 -12 D (0,37 кВт)
	32		ЭПАС 10.1 -14 D (0,75 кВт)		ЭПАС 07.5 -14 D (0,37 кВт)

Анализируя даже незначительный массив данных (табл. 3), ограниченный номенклатурным каталогом производителя запорного клапана НГ 26526-065АЭ -43 [8], можно сделать следующие выводы:

1. С учетом гарантированной электродинамической поправки, величина крутящего момента настройки электропривода на отключение для управления запорным клапаном НГ 26526-065АЭ по ТУ 26-07-1407-2008 может быть значительна, снижена (от 20% до 50%), что позволит не только повысить согласованность системы, но и минимизировать нагрузки, возникающие в запорном клапане под действием электропривода.

2. Корректировка по величине крутящего момента с учетом гарантированной электродинамической поправки и использование данной величины для обеспечения функциональной совместимости запорного клапана НГ 26526-065АЭ с электроприводом в рамках единой электродинамической системы, позволяет обосновать замену ЭПАС -10.1-14D на ЭПАС-07.5 - 14D, что существенно повысит энергоэффективность системы и снизит ее стоимость (разница в цене порядка 20000 рублей).

3. Применение предложенного экспериментально – графического метода на стадии силового расчета запорной арматуры позволит не только повысить согласованность электродинамических систем «электропривод – запорная арматура», но и обеспечить более корректную функциональную совместимость их элементов, улучшив качество и конкурентоспособность отечественной продукции данного типа.

Таким образом, разработка и внедрение энергоэффективных технологий, систем и оборудования является основой энергосбережения и повышения энергоэффективности производства и экономики страны в целом [9]. Обеспечение внутренней согласованности и функциональной совместимости элементов электродинамических систем «электропривод – запорная арматура» является вкладом в решение этих проблем без существенных финансовых затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плахотникова, Е.В. Динамические нагрузки в электроприводной арматуре / Е. В. Плахотникова, Т.А. Елисеева // Трубопроводная арматура и оборудование. - 2012, № 5 (62). - С. 72-75.
2. Плахотникова, Е.В. Повышение эффективности систем «запорная арматура - электропривод» / Е. В. Плахотникова, В. Б. Протасьев // Известия Тульского Государственного Университета. Серия «Технические науки» - Тула: ТулГУ, 2013. – Вып. 6, -Ч 1. - С. 142-152.
3. Ивахненко, А.Г. Структурно-параметрический синтез технологических систем. Монография/ А.Г. Ивахненко, В.В. Куц. – Курск.: Курск. гос. техн. ун-т., 2010. –153 с.
4. ГОСТ Р 53674 – 2009 «Арматура трубопроводная. Номенклатура показателей. Опросные листы для проектирования и заказа»
5. ГОСТ 30709-2002 «Техническая совместимость. Термины и определения»
6. СТ ЦКБА 002-2003 Арматура трубопроводная. Задвижки. Методика силового расчета – С. Пб.: НПФ ЦКБА, 2003. - 69 с.
7. ГОСТ Р 53402-2009 «Арматура трубопроводная. Методы контроля и испытаний»
8. Трубопроводная арматура и специальное оборудование для объектов атомной энергетики. Номенклатурный каталог Корпорация Сплав ПКТИ «Атомармпроект», 2011.

9. Степанова, Е.Ю. Проблемы энергосбережения для крупных компаний / Е.Ю. Степанова // Энергоресурсосбережение – XXI век: Сб. матер. междунар. научн.-практ. Интернет-конф. / Под ред. В.А. Голенкова, А.Н. Качанова, Ю.С. Степанова. – Орел: ООО «Издательский Дом «ОРЛИК» и К», 2008. – С. 157-160.

Плахотникова Елена Владимировна

Тульский государственный университет

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальные и метрологические системы»

300012, г. Тула, пр. Ленина, 92

Тел.: 8 (4872) 332538

E-mail: e_plahotnikova@mail.ru

Протасьев Виктор Борисович

Тульский государственный университет

Д-р технических наук, профессор кафедры «Инструментальные и метрологические системы»

300012, г. Тула, пр. Ленина, 92

Тел.: 8 (4872) 332538

E-mail: imstulgy@pochta.ru

E.V. PLAHOTNIKOVA, V.B. PROTASEV

IMPROVEMENT OF QUALITY OF ELECTRODYNAMIC SYSTEMS «THE ELECTRIC DRIVE-STOP VALVES» BY INCREASE OF COHERENCE AND FUNCTIONAL COMPATIBILITY OF THEIR ELEMENTS

The theoretical and experimental justifications confirming lack of coherence of electrodynamic systems are given in article "the electric drive – stop valves", bringing to considerable deviations of the actual electrodynamic moments of system from the requirements stated in technical documentation. The method of elimination of a mismatch of system by the accounting of the guaranteed electrodynamic amendment and providing requirements of tightness of stop valves, at the expense of use of energy accumulated by the electric drive is offered.

Keywords: *electrodriving stop valves, dynamic loadings, electrodynamic moment, efficiency.*

BIBLIOGRAPHY

1. Plahotnikova, E. V. Dinamicheskie nagruzki v jelektroprivodnoj armature/ E. V. Plahotnikova, T. A. Eliseeva// Truboprovodnaja armatura i oborudovanie. -2012, № 5 (62). - S. 72-75.
2. Plahotnikova, E. V. Povyshenie jeffektivnosti sistem «zapornaja armatura - jelektroprivod»/ E. V. Plahotnikova, V. B. Protas'ev// Izvestija Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Serija «Tehnicheskie nauki» - Тула: TulGU, 2013. – Vyp. 6, -Ch 1. - S. 142-152.
3. Ivahnenko, A.G. Strukturno-parametricheskij sintez tehnologicheskikh sistem. Monografija/ A.G. Ivahnenko, V.V. Kuc. – Kursk.: Kursk. gos. tehn. un-t., 2010. –153 s.
4. GOST R 53674 – 2009 «Armatura truboprovodnaja. Nomenklatura pokazatelej. Oprosnye listy dlja proektirovanija i zakaza»
5. GOST 30709-2002 «Tehnicheskaja sovместimost'. Terminy i opredelenija»
6. ST CKBA 002-2003 Armatura truboprovodnaja. Zadvizhki. Metodika silovogo rascheta – S. Peterburg.: NPF CKBA, 2003. - 69 s., il.
7. GOST R 53402-2009 «Armatura truboprovodnaja. Metody kontrolja i ispytaniij»
8. Truboprovodnaja armatura i special'noe oborudovanie dlja ob#ektov atomnoj jenergetiki. Nomenklaturnyj katalog Korporacija Splav PKTI «Atomarmproekt», 2011.
9. Stepanova, E.Ju. Problemy jenergosberezenija dlja krupnyh kompanij /E.Ju. Stepanova //Jenergorесурсосбережение – XXI век: Сб. матер. mezhduнар. nauchn.-практ. Internet-конф. / Под ред. V.A. Golenkova, A.N. Kachanova, Ju.S. Stepanova. – Орел: ООО «Издательский Дом «ОРЛИК» и К», 2008. – С. 157-160.

Plahotnikova Elena Vladimirovna

Tula State University,

Candidate of technical science, docent of Chair Tool and metrological systems

Russia, Tula, Lenin Avenue, 92

Tel: 8 (4872) 332538

E-mail: e_plahotnikova@mail.ru

Protasev Viktor Borisovich

Tula State University,

Doctor of technical science, professor, professor of Chair Tool and metrological systems

Russia, Tula, Lenin Avenue, 92

Tel: 8 (4872) 332538

E-mail: imstulgy@pochta.ru

УДК 621.891

В.Н. СКВОРЦОВ, В.Н. ПУЧКОВ, А.Ю. АЛБАГАЧИЕВ

ОЦЕНКА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА ПРИ ТРЕНИИ УГЛЕРОДНЫХ ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Результаты испытаний на микротвердость по глубине отпечатка поверхностей трения углеродного фрикционного композиционного материала (УФКМ). Показано наличие количественной связи между результатами испытания на микротвердость и тепловое импульсное трение на машинах трения ИМ-58М и 2168 УМТ «Унистриб».

Ключевые слова: фрикционные материалы, трение, испытание, поверхность, контакт, микротвердость,

В настоящее время происходит формирование новых рынков продукции, наиболее прибыльными из которых является мировой рынок наукоемкой продукции [1, 2]. К такой продукции относятся и тормозные диски авиационной техники из нового композиционного углерод-углеродного материала, который в несколько раз легче и прочнее металлокерамических, что очень важно для авиационной техники.

Углеродно-фрикционные композиционные материалы (УФКМ) представляют собой композиты системы углерод-углерод, в которых армирующими элементами являются высокомолекулярные и высокопрочные углеродные волокна, с матрицей пиролитического графита, кокса каменноугольного пека или кокса полимерных органических веществ.

Специфической особенностью трибологических процессов во фрикционных элементах, при их работе, является образование так называемого рабочего слоя с новыми физико-химическими и фрикционно-износными свойствами. Образование этого слоя связано: с выгоранием и разложением связующего вещества и окислением; образованием пленок и третьего тела на фрикционном контакте; структурными превращениями; температурной нестабильностью контакта и потерей контактом несущей способности.

Кроме того, в процессе нестационарного трения, имеющего место в нагруженных фрикционных устройствах, существенно и непрерывно изменяются физико-механические и фрикционно-износные свойства материалов пары, вследствие непрерывного изменения температуры на фрикционном контакте и в объеме материала. Все эти изменения происходят взаимосвязано и взаимообусловлено [3 - 5].

В этой связи большое практическое значение приобретают вопросы изучения микро-механического состояния поверхности контакта с помощью метода микротвердости по глубине отпечатка [6, 7]. При этом определение одной лишь величины микротвердости является необходимым, но не достаточным условием для полного анализа состояния поверхности.

Сопротивление поверхности трения разрушению, ее упругие свойства и способность к релаксации энергии, накопленной в процессе деформации, вязкоупругие и диссипативные характеристики, существенно дополняют и расширяют информативность о микро-механическом состоянии поверхности углероднофрикционного композиционного материала.

В работе представлены результаты исследования микротвердости по глубине отпечатка одного из серии образцов материалов композиционной системы углерод-углерод (УФКМ-11). Область применения: тормозные устройства в авиационной технике. Состав, технология изготовления, а также виды углеродного волокна и связующего, в работе не раскрываются.

1. ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. ОБРАЗЦЫ

Испытание образцов материала УФКМ-11 на микротвердость проводится на приборе МТИ-3М. Методической особенностью прибора является регистрация диаграмм упруго-пластической деформации испытываемого материала в координатах “Сила-глубина отпечатка”. Прибор удовлетворяет условиям Российского Стандарта ГОСТ 10717-95 “Приборы для измерения микротвердости (Типы и основные параметры)”

По диаграмме, получаемой с помощью микротвердомера, производят оценку кинетических особенностей микродеформации поверхности образца при вдавливании алмазного индентора, расчет микротвердости, работ пластической (вязкой) и упругой деформаций.

Система обозначений параметров микротвердости соответствует ГОСТ 9450-95 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников». Метод испытания-по невосстановленному отпечатку. Форма алмазного индентора-четырёхгранная алмазная пирамида типа НПМ (пирамида Виккерса) с углом между противоположными гранями в 136° (ГОСТ 9377-95 «Наконечники алмазные к приборам для измерения твердости металлов и сплавов»).

В соответствии с рациональным циклом модельных испытаний фрикционных пар, испытание на трение и износ УФКМ-11 проводились на теплоимпульсное трение и фрикционную теплостойкость [3 - 5].

Модельные испытания образцов фрикционных пар на теплоимпульсное трение, в режиме торможения с безвибрационным и вибрационным и нагружением, проводились на машине трения ИМ-58М. Параметры испытания по работе трения, удельной нагрузке и начальной скорости скольжения соответствовали основному режиму работы многодискового тормоза на самолете с желательной продолжительностью времени торможения $t_{\tau}=37$ с. Частоты приложения модельной нормальной нагрузки менялись ступенями: 0, 5, 10 и 15 Гц. С учетом реальных условий работы автомата торможений, общее число торможений-50 на каждом режиме. Размеры большого кольцевого образца: наружный диаметр-75 мм, внутренний-53 мм, высота-14 мм.

Испытание материалов УФКМ-11 на фрикционную теплостойкость в диапазоне номинальных давлений 0,45, 0,8 и 1,1 МПа и широком диапазоне скоростей скольжения (50, 300, 700, 1000, 2000, 2500 и 3000 об/мин) проводилось на машине трения 2168 УМТ («УНИТРИБ»). Эти режимы испытаний соответствовали реальным режимам трения в дисковых тормозах таких самолетов, как ТУ-124, ИЛ-96М и др. Размеры малых кольцевых образцов: внешний диаметр 28 мм, внутренний 20 мм и высота 15 мм. Их маркировки, до испытания на машине трения, А, В, С. После испытаний в режимах давлений 0,45, 0,8 и 1,1 МПа соответственно $A_{0,45}$, $B_{0,8}$ и $C_{1,1}$.

Порядок проведения испытаний образцов на микротвердомере МТИ-3М следующий. На первом этапе испытываются поверхности после их изготовления и предварительной притирки на машине трения. У большого кольцевого образца испытывалась как рабочая, контактирующая поверхность, так и его обратный (не рабочий) торец. На следующих этапах испытывались эти же поверхности после каждого этапа испытания на машинах трения.

Из контактной пары образцов испытанию на микротвердость подвергалась поверхность вращающегося образца-ротора. Выбор именно ротора не случаен. По многочисленным данным трибологических результатов испытаний на машинах трения, его поверхность наиболее чувствительна к воздействию внешних факторов (давлению, температуре, частоте и т.д.).

Вся поверхность ротора разбивается на три сектора (под углом 120°) таким образом, чтобы структура поверхности в каждом секторе соответствовала типичной структуре всей поверхности трения. Количество регистрируемых диаграмм для каждой поверхности ротора не менее 30 (по 10 на каждый сектор).

2. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Микроскопический анализ поверхности образцов после их изготовления и предварительной притирки показал, что структура композита состоит из углеродных волокон диаметром 6-12 мкм, располагающихся в углеродной матрице. Граница раздела между волокнами и матрицей четко разделена. Конфигурация поперечного среза волокна близка к круглой форме и его боковая поверхность имеет относительно гладкую поверхность. Внутри волокон наблюдаются микротрещины и поры. Эти же «дефекты» имеются и в углеродной матрице. Обнаруживаются два типа расположения волокон в матрице. В первом типе волокна распо-

ложены параллельно друг другу, образуя пучки с количеством волокон от нескольких штук до нескольких десятков. Для этого типа структуры характерно наличие микротрещин по границам пучков. Во втором случае отдельные волокна расположены под углом друг к другу и переплетаются между собой, образуя сетку и пустоты между волокнами. При этом магистральные трещины не образуются, поскольку хаотично расположенные прочные волокна являются препятствием для слияния отдельных пустот. Подобная композиция является основной и объективной причиной значительного разброса диаграмм деформации, а, следовательно, и микротвердости по поверхности композита.

Как правило, микромеханическое состояние поверхности трения, не должно определяется в отдельности достаточно высокой микротвердостью волокнистого материала или низкой микротвердостью матрицы. Для корректной интерпретации результатов испытаний на микротвердость, необходимо учитывать статистические аспекты. В первую очередь, это относится к таким выборочным показателям описательной статистики как, при заданном уровне надежности 95%, размер выборки, выборочное среднее, стандартное отклонение и дисперсия, а также диапазон значений.

Применение дисперсионного анализа крайне важно для принятия гипотезы о существенном или не существенном влиянии частоты или давлений на микромеханическое состояние поверхности трения до и после испытаний на машинах трения ИМ-58М и 2168 УМТ «Унитриб».

3. ДИАГРАММЫ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ИХ ОБРАБОТКА

Описание и анализ диаграмм упругопластической деформации достаточно полно отражен в литературе, посвященной вопросам микротвердости по глубине отпечатка с записью кинетических диаграмм [6, 7]. В настоящей работе мы коснемся лишь принципа их обработки для получения параметров, необходимых для оценки микромеханических характеристик поверхности трения УФКМ.

СТАТИСТИКА

Общее количество отпечатков (диаграмм упругопластической деформации) по поверхности вращающегося образца (ротора) не менее 30. Первоначальный этап обработки диаграмм включал в себя оценку размеров глубин отпечатков h_i при силе на инденторе $F=150$ сН. При этой силе, определялась микротвердость

$$HV = \frac{37,8 \cdot F}{h^2}$$

При размерностях F в граммах (в тексте и на рисунках в сН) и h в мкм, коэффициент 37,8 соответствует размерности микротвердости кгс/мм².

На следующем этапе проводился статистический анализ всех выборок по глубине отпечатка h и микротвердости HV . Были определены параметры основной описательной статистики (среднее значение, среднеквадратическое отклонение, дисперсия) и дополнительные характеристики (интервал, минимальные и максимальные значения, коэффициент вариации и т.д.). По результатам статистического анализа, для каждой выборки, был принят нормальный закон распределения экспериментального материала с уровнем надежности 95%.

С целью выявления значимости влияния рабочих режимов машин трения, на микромеханическое состояние поверхности трения ротора, был проведен однофакторный дисперсионный анализ. В результате проведенного анализа был сделан основной вывод: действие частоты вибрации, при модельных испытаниях в режиме торможения с безинерционным и инерционным воздействиями, а также влияние давлений при испытании на фрикционную теплостойкость, на микротвердость поверхности трения ротора образцов УФКМ *существенно*.

В то же время, этот анализ показал, что действие частоты вибрации, при модельных испытаниях в режиме торможения с безвибрационным и вибрационным воздействиями, на микротвердость поверхности не контактирующих поверхностей ротора, *не существенно*. Влияние же давлений, при испытании на фрикционную теплостойкость, *значимо*.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

На рисунке 1 показаны три из 30 диаграмм, полученные для поверхности ротора после токарной обработки и предварительной ее притирки и предназначенного для испытания на машине трения ИМ-58М.

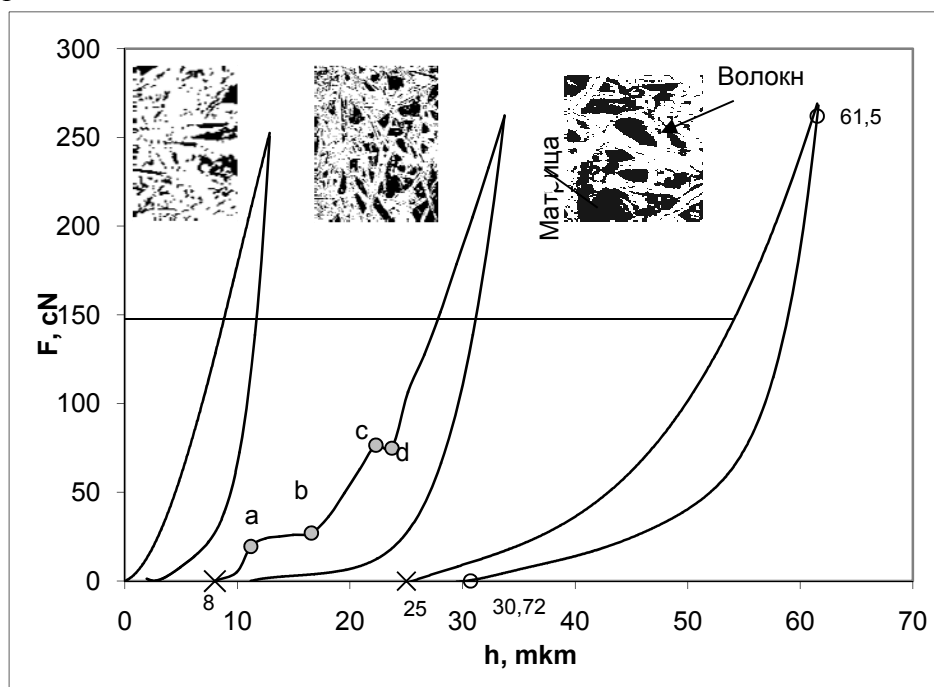


Рисунок 1 – Диаграммы упругопластической деформации, зафиксированные на трех участках поверхности ротора. Темные места на фотографиях углеродная матрица. Светлые пучки-волокна. Увеличение фотографий 100 крат

Для трех диаграмм показаны фотографии участков, где проводилась запись диаграмм.

Очевидно, что первая диаграмма, с минимальным размером глубины отпечатка, характеризует сопротивление деформации наиболее твердой составляющей композита, а именно сгустка волокон. Этот участок, с явным преобладанием тесно переплетенных между собой высокопрочными волокнами, характеризуется повышенной микротвердостью. Вторая диаграмма зафиксирована на участке поверхности, где наряду с волокнами просматриваются и участки матрицы. Особенность подобных диаграмм в том, что при некоторых силах F , на стадии деформации, возможно образование резких скачков глубины отпечатков (участки a-b и c-d). Причина: микротрещины и поры внутри волокон и матрицы. Третья диаграмма, с максимальным размером отпечатка, зарегистрирована на участке с явным преобладанием более мягкой составляющей композита-матрицы.

По экспериментальным точкам участков диаграмм "Нагружение" рисунка 1, на рисунке 2 показаны графики зависимости кинетической микротвердости от глубины отпечатка.

Пластичность композита оценивалась площадью диаграммы, ограниченной участками «Нагружение» и «Разгрузка», а коэффициент пластичности K_p по формуле

$$K_p = \frac{A - A_e}{A} = \frac{A_p}{A}$$

где A -работа упругопластической деформации; A_e -работа упругой деформации при разгрузке образца; A_p -работа пластической деформации.

Для оценки указанных работ деформаций, использовался либо численный метод, либо аналитический с описанием участков диаграмм полиномиальными зависимостями с последующим их интегрированием. Так, например, для третьей диаграммы рисунка 1 упругопластическая и упругая деформации хорошо описывалась кубической параболой с коэффициентом детерминации $R^2 = 1$. Работа A определялась интегрированием этой функции в пределах

глубины отпечатка от 25 мкм до ее максимального значения $h_{\max} = 61,5$ мкм. Работа упругой деформации A_e в пределах от 30,72 мкм до 61,5 мкм.

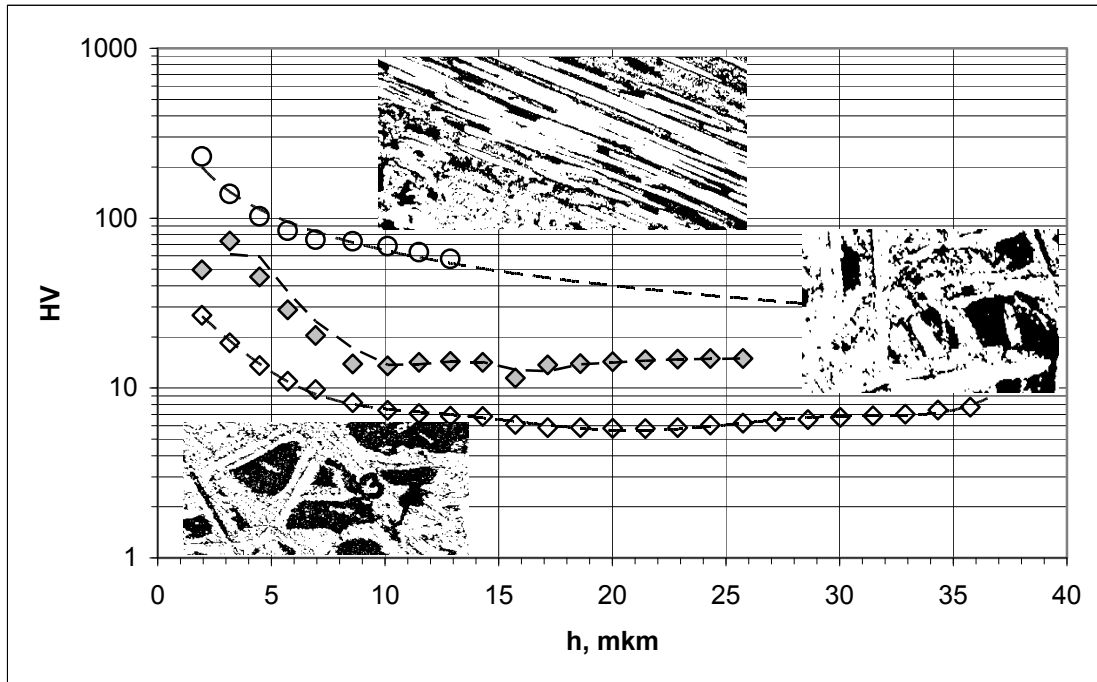


Рисунок 2 – Зависимости кинетической микротвердости от глубины отпечатка композита. Построены по участкам диаграмм «Нагружение» рисунка 1

4. ПАРАМЕТРЫ МИКРОТВЕРДОСТИ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В таблице 1, в колонке "Статистические параметры" представлены некоторые основные и дополнительные характеристики описательной статистики для поверхности ротора. В правой части таблицы под рубрикой «Микротвердость HV_{150} » (при силе на инденторе микротвердомера в 150 сН) отражены числовые значения этих характеристик до («Исходная») и после (0, 5, 10, 15 Гц) испытания на машине трения ИМ-58М. Под рубрикой «Параметры процесса торможения», во второй нижней части таблицы, показаны характеристики трибологических испытаний на машине трения ИМ-58М.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

А. Модельные испытания на торможение.

Исходное состояние образцов. Операция изготовления необходимой формы рабочего образца на токарном станке приводит к четкому выявлению составляющих композита.

Значительный разброс статистических параметров, характеризующих микротвердость поверхности (см. минимум и максимум в табл. 1 для состояния "Исходная"), позволяет оценить микротвердость как сгустка волокон, так и участков с явным преобладанием матрицы композиционного материала. Как и следовало ожидать, микротвердость первого участка является наибольшей и составляет $HV = HV_{\max} = 44,8$ кгс/мм², а второго минимальной $HV = HV_{\min} = 7,3$ кгс/мм².

Анализ диаграмм упругопластической деформации показал (см. рис. 1) следующее. Первая и третья диаграммы на стадии «Нагружение» имеют плавный характер. Крайне редко, но обнаруживается нарушение плавности на участке с преимущественным преобладанием на поверхности матрицы. Причина-наличие пор. Диаграмма, зафиксированная на участке поверхности без преимущественного преобладания волокон или матрицы (см. среднюю диаграмму и фото на рис. 1), в точках а и d может иметь резкие перегибы кривой на этой стадии деформации поверхности.

Таблица 1 – Материал УФКМ-11. Статистические параметры микротвердости HV_{150} и параметры процесса торможения с частотами приложения нормальной модельной нагрузки 0, 5, 10 и 15 Гц.

Статистические параметры	Микротвердость HV				
	Исходная	0 Гц	5 Гц	10 Гц	15 Гц
Среднее HV	22,81	11,06	29,91	10,26	12,99
Стандартное отклонение S	10,41	2,303	10,01	2,883	4,306
Минимум HV_{min}	7,271	7,714	13,71	5,357	4,461
Максимум HV_{max}	44,79	16,32	52,04	16,2	23,74
Коэффициент вариации	0,457	0,208	0,335	0,281	0,332
Работа, сН•мкм					
Упругопластическая A	5468	2119	1864	3556	3496
Упругая A_e	2825	1043	923	2018	2022
Пластическая A_p	2643	1076	941	1538	1474
Коэффициент пластичности K_p	0,483	0,508	0,505	0,433	0,422
Параметры процесса торможения (усреднение по 50 торможениям)	Частота вибрации ν , Герц				
	0	5	10	15	
Время торможения $t_{т.с}$ ($t_{т.с}=36,6$ с)	39,8	47,4	35,2	31,6	
Усредненный коэф. трения f	0,33	0,28	0,356	0,42	
Коэффициент стабильности $\square_{ст.}$	0,81	0,785	0,75	0,79	
Эффективность торможения $\square_{эф} \cdot 10^{-4}$, $1/c^2$	5,22	4,51	7,94	9,22	
Износ ротора \square , мкм/торм.	3,8	1,8	5,2	6,9	

Как правило, число подобных диаграмм не превышает 10-15% от общего (порядка 30) количества зарегистрированных диаграмм. Причины подобной «дефектности» могут быть разные. Это и возможность, в процессе непрерывного вдавливания индентора, попадания последнего в пору, и хрупкое разрушение элементов матрицы, и, наконец, разрыв острыми ребрами алмазного индентора волокон. При такой картине поведения индентора при его вдавливании в поверхность образца, зависимость микротвердости от глубины отпечатка носит скачкообразный характер (см. рис. 2 - средняя диаграмма). Усредненное значение величины микротвердости поверхности, ротора при силе на инденторе в 150 сН, составило $HV = 22,8$ кгс/мм² (см. табл. 1).

Модельные испытания в режиме торможения с безвибрационным (нулевая частота) и вибрационным нагружениями (5, 10 и 15 Гц) существенно изменяет микромеханическое состояние поверхности трения ротора. В первую очередь необходимо отметить факт качественного изменения характера диаграмм как при безинерционными, так и при инерционных воздействиях.

На рисунке 3 показана диаграмма, для частоты вибрации 15 Гц с точками перелома (а и б) участков "Нагружение" и "Разгружение". По характеру деформации, при нагружении и разгрузении, она напоминает механическую характеристику "хлопающей мембраны", жестко закрепленной по внешнему контуру и нагружаемой по центру сосредоточенной нагрузкой. Процент зарегистрированных диаграмм подобного типа достаточно высок и составляет почти 70% от всех зарегистрированных диаграмм.

Поскольку диаграммы этого типа проявляются уже при нулевом частотном воздействии, то, на наш взгляд, одной из основных причин их появления является достаточно высокая температура (порядка 400⁰С.) в объеме, а, следовательно, и на поверхности контакта образцов в режиме торможения.

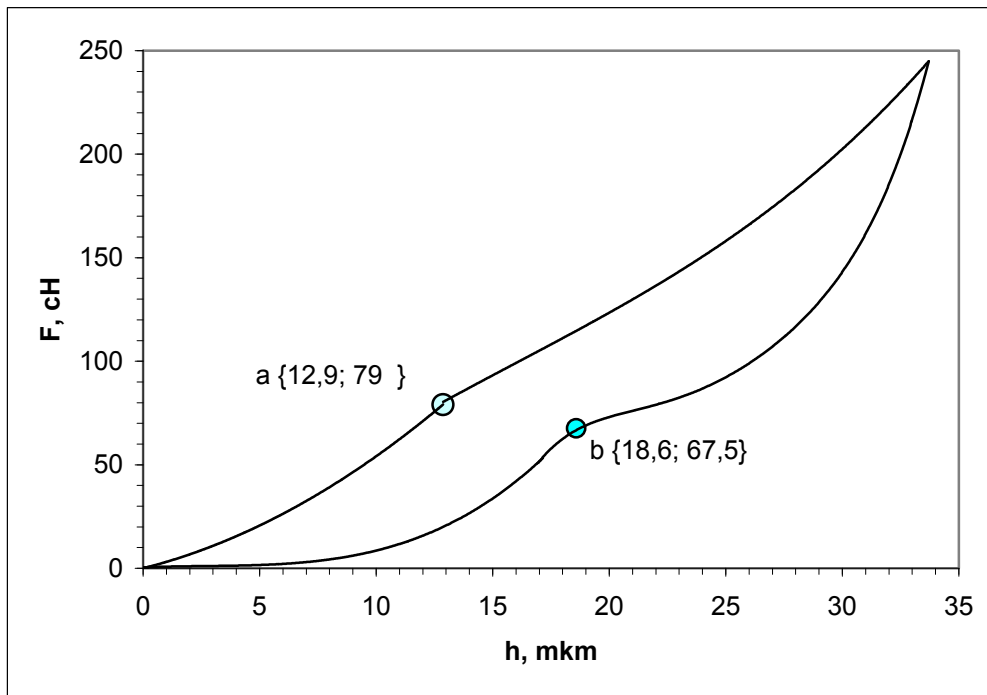


Рисунок 3 – Диаграмма деформации материала УФКМ и микротвердость HV (правая логарифмическая ось ординат) после испытания на машине трения ИМ-58М в режиме торможения с частотой 15 Гц

Вероятно, это оказалось достаточным для образования нового поверхностного слоя с толщиной определяемой точкой перелома *a* с координатами $F = 79$ сН и $h = 12,9$ мкм. Усредненная величина толщины этого слоя при безинерционных воздействиях оказалась равной 4,2 мкм. С ростом инерционных воздействий она увеличивается. При частоте 5 Гц ее средняя величина составила 5,6 мкм, при 10 Гц – 8,4 мкм и 12,9 мкм при максимальной частоте вибрации в 15 Гц.

Аналогичный вид кривой проявляется и в процессе разгрузки образца. В точке *b* наблюдается перелом кривой участка «Разгрузка».

Б. Испытания на фрикционную теплостойкость (табл. 2).

В таблице 2 представлены аналогичные характеристики для малых кольцевых образцов до, и после испытания на фрикционную теплостойкость на машине трения 2168 УМТ «Унитриб». Обозначения в таблице соответствуют: A_i , B_i , и C_i исходным поверхностям образцов, предназначенных для испытания на машине трения с силами 0,45, 0,8 и 1,1 МПа.

$A_{0,45}$, $B_{0,8}$, и $C_{1,1}$ поверхностям образцов после испытания с указанными силами.

Исходные поверхности малых кольцевых образцов. Изготовление малых кольцевых образцов, приводит к значительному разбросу микротвердости по поверхности контакта. Из таблицы 2 видно, что если микротвердости поверхностей образцов A_i и B_i , после их изготовления на токарном станке и предварительной притирки, практически близки и равны соответственно $HV = 14,55$ и $HV = 16,69$, то микротвердость поверхности образца C_i почти в 2 раза меньше и составляет $HV = 5,62$. Наибольшая дисперсия и коэффициент вариации наблюдается у образца A_i ($s^2 = 117,7$ и $V = 0,746$), минимальные у C_i . Как следствие, у первого большой интервал величины микротвердости (от $HV = 4$ до $HV = 35,7$), и наименьший у второго (от $HV = 3,22$ до $HV = 8,74$).

Как правило, уменьшение площади поверхности приводит к укорочению длины волокон с появлением на них следов трещин, обрывов. Как следствие, это ведет к нарушению прочности сцепления волокон с элементами матрицы в отдельных микрообъемах.

Таблица 2 – Статистические параметры микротвердости и параметры испытания на фрикционную теплостойкость УФКМ-11 в диапазоне номинальных давлений 0,45, 0,8 и 1,1 МПа

Статистика,	Микротвердость HV					
	A _i	A _{0,45}	B _i	B _{0,8}	C _i	C _{1,1}
Среднее HV	14,55	26,35	16,69	36,34	5,622	20,95
Стандарт. отклонение S	10,85	8,475	9,42	13,87	1,574	12,95
Дисперсия	117,7	71,83	88,74	192,4	2,477	167,7
Минимум HV _{min}	3,998	9,657	4,027	9,548	3,221	4,212
Максимум HV _{max}	35,72	46,21	34,94	60,36	8,739	62,12
Коэф. вариации	0,746	0,322	0,564	0,382	0,628	0,617
Работа, сН мкм						
Упругопластическая A	2750	2005	1614	2211	3557	1979
Упругая A _e	977	720	595	954	1212	864
Пластическая A _p	1772	1285	1018	1258	2346	1114
Коэффициент пластичности K _p	0,645	0,641	0,631	0,569	0,659	0,563
Трибологические параметры						
Давление P, МПа		0,45		0,8		1,1
Число оборотов n, об./мин		3000		2500		2500
Коэффициент трения f		0,401		0,277		0,452
Коэф. стабильности □ _{см.}		0,7		0,8		0,8
Интенсивность износа I _h ·10 ⁻⁹		2,28		15,6		28,9

Другими словами нарушается целостность поверхности трения. Диаграммы, в основном, на стадии «Нагружение» аналогичны диаграммам рисунка 1. Все вышесказанное подтверждается микроскопическими исследованиями поверхности трения, где четко проявляются структура композита с вышеуказанными дефектами, после изготовления образца. Отсюда и весьма низкие, по сравнению с большим кольцевым образцом, значения величин микротвердости. Так, если у образцов A_i, B_i и C_i наименьшая микротвердость, в среднем, составляет приблизительно HV = 4 (Таблица 2), то у большого она равна HV = 7,27 кгс/мм² (см. табл. 1).

Фрикционные испытания на теплостойкость с давлениями 0,45, 0,8 и 1,1 МПа существенно изменяют значения исходных величин микротвердости и статистических параметров. Происходит как бы упорядочение структуры поверхности трения с резким увеличением прочности этой поверхности. На всех трех поверхностях образцов наблюдается рост усредненной микротвердости. У A_i с HV = 14,55 до HV = 26,35, у B_i с HV = 16,69 до HV = 36,34. Наибольшее упрочнение поверхности оказалось у образца C_i после испытания при давлении 1,1 МПа (с HV=5,622 до HV=20,95). При этом если у первых двух наблюдается уменьшение коэффициента вариации (с 0,746 до 0,322 у A и с 0,564 до 0,382 у B), то у третьего он резко возрос с 0,28 до 0,617.

Диаграмм с четким проявлением эффекта "хлопающей мембраны", при этом виде испытания, обнаружено не было. Однако на одной трети из тридцати диаграмм, на участке "Нагружение" наблюдались точки перелома, хотя и слабо выраженные. На участке "Разгружение" подобных точек обнаружено не было. Отсутствие эффекта образования пленки, вероятно, можно объяснить малой площадью поверхности трения и нарушением первоначальной механической связи волокон с элементами матрицы.

Следует отметить достаточно высокие значения коэффициента пластичности K_p поверхности образцов как до, так и после испытания на машине трения. Их величины (табл. 2) превышают оптимальное значение K_p≈0,5 больших кольцевых образцов (табл. 1). Это закономерно в силу вышесказанного.

По результатам трибологических испытаний, коэффициент стабильности α_{см.} достаточно стабилен и высок (0,7, 0,8 и 0,8 табл. 2). Возрастные интенсивности износа, с ростом

давлений (с 2,28 до 18,9) Весьма не стабилен коэффициент трения (0,401; 0,277; 0,452). Как показали осциллограммы записи коэффициента трения в процессе трибологических испытаний, наблюдается достаточно широкий интервал его изменения (от 0,2 до 0,9). При этом резкое увеличение коэффициента трения в процессе сопровождается фретинговой составляющей (колебательным процессом).

Интересно сравнение коэффициента трения с микротвердостью поверхности ротора. Если при нагрузке $P = 0,45$ МПа его средняя величина составила 0,401, то при нагрузке $P = 0,8$ МПа его значение уменьшилось почти в 2 раза и составило $f=0,277$. При давлении 1,1 МПа коэффициент трения вновь стал высоким ($f = 0,452$). Минимальный коэффициент трения пришелся на высокую микротвердость изношенной поверхности ротора В (при давлении 0,8 МПа $HV = 36,6$). При визуальном исследовании поверхности трения, в большей ее части наблюдались участки с белым блестящим цветом характерным для волокна. Как было сказано выше, максимальной микротвердостью обладает именно волокно как в своем первоначальном, так и не до конца изношенном состоянии. По всей видимости, преобладание по поверхности трения именно этой составляющей композита должно снижать коэффициент трения и увеличивать микротвердость поверхностного слоя.

В заключении отметим, что в настоящую работу включен не совсем лучший по фрикционно-износным параметрам материал. Встречались материалы с весьма низкими коэффициентами пластичности, стабильностью и эффективностью торможения. Так, испытанный материал, под условной маркой УФКМ-13, обладал наименьшими коэффициентами пластичности (в среднем 0,5 для исходных поверхностей и меньше 0,4 после испытаний на машинах трения), Следствием этого явилось увеличение износостойкости и приближение экспериментальных времен торможения к расчетному значению. Рассмотренный же композиционный материал же УФКМ-11 обладает способностью к образованию, после модельных испытаний на торможение, поверхностной пленки. Это и явилось основной причиной включения его в настоящую работу.

Методика оценки упругопластических свойств фрикционного контакта углеродных фрикционных композиционных материалов (УФКМ) успешно используется в совместных работах ИМАШ им. академика А.А. Благонравова РАН с отечественным Авиационной корпорацией «Рубин» (г. Балашиха) и НПО «НИИ Графит» при разработке новых марок УФКМ и для оптимального исследования их в нагруженных многодисковых тормозах гражданских и военных самолетов.

Эта же методика была успешно использована в совместных работах с американской авиационной компанией «Боинг» для оценки 20 марок УФКМ производства таких зарубежных фирм как «Бендикс», «Эллайд Сигнал», «Хаувел», «Гудрич», «Гудьир» и «Данлоп». С этими марками сравнивались наши отечественные УФКМ типа «Термар», разработанных НПО «НИИГрафит» совместно с Авиационной корпорацией «Рубин».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова, Е.Ю. Маркетинг инноваций: проблемы и решения / Е.Ю. Степанова, Ю.С. Степанов // Экономические и гуманитарные науки. – 2011. - № 12 (239). – С. 24-30.
2. Степанова, Е.Ю. Высокие технологии в инновационной экономике /Е.Ю. Степанова, Л.И. Поландова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2007. - № 3/267 (533). – С. 156-167.
3. Материалы в триботехнике нестационарных процессов / А.В. Чичинадзе, Р.М. Матвеевский, Э.Д. Браун.. - М. : Наука, 1986. - 248 с.
4. Справочник по триботехнике. Т.3 / Под общ. ред. М. Хебды, А.В.Чичинадзе.-М. : Машиностроение, Варшава ВКЛ,1992. - 730 с.
5. Трение, износ и смазка / Под ред. А. В. Чичинадзе. - М. : Машиностроение, 2003. - 576 с.
6. Скворцов, В.Н., Матвеевский Р.М., Бородкин В.А. Автоматизированный комплекс МТИ-3М для измерения микротвердости материалов и покрытий /В.Н. Скворцов, Р.М. Матвеевский, В.А. Бородкин // Заводская лаборатория. - № 2. – 1991. - С. 55-58.
7. Исследование распределения микротвердости по поверхности контакта углеродных фрикционных композиционных материалов /В.Н. Скворцов, А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, В.М. Синайский //Механика и физика фрикционного контакта. - Вып. 8. - ТВПИ, 2001. - С. 27-47.
8. Воронцов, А.Л. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении / А.Л. Воронцов, А.Ю. Албагачиев, Н.М. Султан-Заде //ТНТ. - 2013. - 552 с.

Скворцов Виктор Николаевич

ИМАШ РАН

Научный сотрудник

Тел.: 89037653798

E-mail: skvorch@imash.ru

Пучков Владимир Николаевич

ИМАШ РАН

Кандидат технических наук, заведующий лабораторией

Тел.: 8(495) .:+7(495)6899037

E-mail: puchkov.v.n@bk.ru

Албагачиев Али Юсупович

ИМАШ РАН.

Доктор технических наук, проф., заведующий лабораторией

Тел.: 8(495) .:+7(495) 2694588

E-mail: albagachiev@yandex

V.N. SKVORTSOV, V.N. PUCHKOV, A.YU. ALBAGACIEV

EVALUATION OF ELASTOPLASTIC PROPERTIES OF FRICTIONAL CONTACT FRICTION CARBON FRICTION COMPOSITES

The results of a microhardness tests on measured through the depth carbon frictional composite (CFCM). Quantitative correlation between microhardness data, friction heat resistance test results and thermal impulse tests made on test devices THEM-58M and 2168 UMT "Unitrib" is shown

Key words: friction, friction materials, testing, surface microhardness, contact

BIBLIOGRAPHI

1. Stepanova, E.Ju. Marketing innovacij: problemy i reshenija / E.Ju. Stepanova, Ju.S. Stepanov //Jekonomicheskie i gumanitarnye nauki. – 2011. - № 12 (239). – S. 24-30.
2. Stepanova, E.Ju. Vysokie tehnologii v innovacionnoj jekonomike /E.Ju. Stepanova, L.I. Polandova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2007. - № 3/267 (533). – S. 156-167.
3. Materialy v tribotehnike nestacionarnyh processov / A.V. Chichinadze, R.M. Matveevskij, Je.D. Braun.. - M. : Nauka, 1986. - 248 s.
4. Spravochnik po tribotehnike. T.3 / Pod obshh. red. M. Hebdy, A.V.Chichinadze.-M. : Mashinostroenie, Varshava VKL,1992. - 730 s.
5. Trenie, iznos i smazka / Pod red. A. V. Chichinadze. - M. : Mashinostroenie, 2003. - 576 s.
6. Skvorcov, V.N., Matveevskij R.M., Borodkin V.A. Avtomatizirovannyj kompleks MTI-3M dlja izmerenija mikrotverdosti materialov i pokrytij /V.N. Skvorcov, R.M. Matveevskij, V.A. Borodkin // Zavodskaja laboratorija. - № 2. – 1991. - S. 55-58.
7. Issledovanie raspredelenija mikrotverdosti po poverhnosti kontakta uglerodnyh frikcionnyh kompozicionnyh materialov /V.N. Skvorcov, A.V. Chichinadze, Je.D. Braun, V.M. Sinajskij //Mehanika i fizika frikcionnogo kontakta. - Vyp. 8. - TVPI, 2001. - S. 27-47.
8. Voroncov, A.L. Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov v mashinostroenii /A.L. Voroncov, A.Ju. Albagačiev, N.M. Sultan-Zade //TNT. - 2013. - 552 s.

Victor Nikolaevich Skvortsov

IMASH Wounds

Sciences Researcher

Тел.: 8(495) .:89037653798

E-mail: skvorch@imash.ru

Puchkov Vladimir Nikolaevich

IMASH Wounds

Cand. Sc. Tech., Head of the laboratory

Тел.: 8(495) .:+7(495)6899037

E-mail: puchkov.v.n@bk.ru

Albagačiev Ali Yusupovich

IMASH Wounds.

Doc. Sc. Tech., Prof., head of the laboratory

Тел.: 8(495) .:+7(495) 2694588

E-mail: albagachiev@yandex

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.22:538.975

Е.В.ОВЧИННИКОВ, Н.М.ЧЕКАН, И.П.АКУЛА

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ $AlTiN$

Исследовано влияние технологических параметров формирования покрытий на функциональные характеристики. Установлено, что покрытие представляет собой двухфазную систему. Количество второй фазы в матрице покрытия зависит от условий формирования покрытия и с увеличением давления в объеме рабочей камеры происходит уменьшение процентного содержания включений в покрытии. Покрытия $TiAlN$ могут успешно применяться в металлообработке при высоких скоростях обработки металлов. Перспективным направлением является применение многослойных покрытий для формирования гетероструктур.

Ключевые слова: покрытие, алюминий, титан, нитриды, структура, свойства, плазма.

Введение. Повышение эксплуатационных характеристик металлообрабатывающего инструмента достигается путем формирования на его рабочих поверхностях, так называемых твердых и сверхтвердых антифрикционных, антиадгезионных покрытий. Примерно до 30 % металлообрабатывающего инструмента эксплуатируется при повышенных температурах без подвода внешней смазки. Однако и смазочно-охлаждающие жидкости в большинстве случаев не в состоянии отвести мгновенно тело от локальных источников, возникающих на поверхности металлообрабатывающего инструмента при эксплуатации. Таким образом, повышенная термостойкость является также одним из определяющих факторов, отвечающих за работоспособность металлообрабатывающего инструмента [1].

Широко применяются плазмохимические покрытия на базе нитрида титана, карбида титана, карбонитрида титана, нитрида циркония и т.д. Однако температурный диапазон эксплуатации данных покрытий не превышает 973 К. Увеличение температуры приводит к протеканию термоокислительных процессов, сопровождающихся образованием новых структурных составляющих с низкими антифрикционными и адгезионными характеристиками. В настоящее время ведутся исследования по получению покрытий на базе интерметаллических соединений $AlTiN$, которые обладают высокой температурной и способны эксплуатироваться до температур, превышающих 1073 К. Согласно имеющимся в литературе данным и проведенным исследованиям данные покрытия обладают высокой твердостью порядка до 40 ГПа. Согласно данным, изложенным в работах [2-4], свойства и структура соединений на базе $AlTiN$ существенно зависят от условий формирования и химического состава.

По литературным данным [2-5] в покрытиях состава $Ti_{1-x}Al_xN$ максимальная твердость (до 40 ГПа) достигается, когда значение параметра x в формуле нитрида составляет 0,5–0,6. В неравновесных условиях вакуумно-дугового осаждения именно такое соотношение Ti/Al является критическим с точки зрения растворимости элементов в решетке нитридов. При более низком содержании Al формируется твердый раствор на базе кубического TiN со структурой типа $NaCl$. При более высоком – гексагональная структура вюрцита, характерная для AlN [5]. В настоящее время интенсифицированы исследования по изучению тройных и более сложных соединений, которые обладают высокими по сравнению с бинарными соединениями физико-механическими характеристиками. Применение систем $AlTiN$ (алтин) позволяет существенно увеличить термоокислительную стабильность при увеличении прочностных и триботехнических характеристик. Включение атомов Al в кристаллической структуре нитрида титана не только увеличивается устойчивость к окислению, путем формирования прочного и тонкого слоя оксида алюминия (Al_2O_3) на поверхности покрытия, но также и способствует существенному увеличению твердости, по сравнению с простым бинарным нитридом металла [6-10].

Целью данной работы является изучение влияния термической обработки на триботехнические, энергетические параметры и физико-механические характеристики покрытий AlTiN.

Методика исследований. Для исследования свойств покрытия осаждались на пластины из инструментальной стали Р6М5 предварительно закаленные и имеющие твердость HRC 60. Нанесение покрытий осуществлялось в вакуумной установке УВНИПА-1-001, оборудованной катодно-дуговым испарителем с системой электромагнитной фильтрации плазмы, а также ионным источником ИИ-4-0,15.

Для удаления тонкого приповерхностного слоя толщиной порядка 100-300 нм, содержащего загрязнения, перед нанесением покрытия образцы подвергались интенсивной обработке высокоэнергетичными ионами аргона. При этом происходит нагрев поверхностей до 450 С, разрушение окисных пленок и частичное удаление растворенных в металле газов. Обработка проводилась при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере $1,5 \times 10^{-2}$ Па; ток фокусирующего соленоида 3,0 А; ускоряющее напряжение 3500 В при токе 0,06 А. Время ионно-лучевой обработки составляло 30 минут. Для повышения эффективности ионно-лучевой очистки и увеличения глубины проникновения ионов аргона на обрабатываемые изделия подавался отрицательный электрический потенциал 800-1500 В.

Осаждение покрытия проводилось при токе стабилизирующей катушки 1,7 А, токе управляющей катушки 2,0 А и токе дуги 90 А. Давление реакционного газа (азот) находилось в пределах $(0,87-5) \times 10^{-2}$ Па. Во время осаждения покрытия на подложку подавалось напряжение смещения -100 В. Определение влияния термообработки на энергетические параметры и физико-механические характеристики проводили путем выдержки образца с покрытием при заданной температуре в течение 60 минут в муфельной печи. Температуру термообработки варьировали от 293К до 1093К.

В ходе испытаний на термостойкость проверялась устойчивость характеристик тонкопленочного материала после отжига. Образцы подвергались нагреву в муфельной печи СНОЛ модели 25/12 до температур +350...+850°С со скоростью нагрева около 30°С/мин и выдерживались при требуемой температуре в течение 30 минут. Затем они охлаждались, находясь в выключенной печи. Критерием влияния термообработки на характеристики покрытия было изменение микротвердости поверхности и коэффициента трения после проведения испытаний. Для измерения микротвердости покрытий на металлах использовали микротвердомер ПМТ-3. Принцип действия прибора основан на изменении линейной величины диагонали отпечатка *s*, полученного от вдавливания алмазной пирамиды в исследуемый материал под определенной нагрузкой.

Триботехнические исследования проводили на машине трения типа FT-2, которая работает по схеме «сфера-плоскость» в условиях сухого трения трех сферических образцов диаметром $R = 1,5$ мм по плоской поверхности диска (контртела), выполненного из стали и отшлифованного на ровной плоской поверхности наждачной шкуркой или шлифовальной пастой до среднего арифметического отклонения профиля поверхности $R_a = 0,1 - 0,3$ мкм. Образцы закрепляли в зажиме машины трения, протирали тканью «бязь», отбеленной, смоченной в этиловом спирте, рабочую сферу и рабочую поверхность стального диска (контртела), после чего сушили 2 мин при комнатной температуре. Испытания проводили при нормальной нагрузке на три образца до 100 Н, при 60, 120 оборотах верхней головки машины трения в минуту (мин^{-1}), линейной скорости скольжения 0,1-0,2 м/с, температуре поверхности стали (20 ± 5) °С.

Результаты исследований. Проведенные исследования по изучению влияния термообработки на прочностные характеристики покрытий представлены на рисунке 1. Согласно, полученных данных, термообработка приводит к снижению твердости покрытий. Однако, значения микротвердости покрытий после проведения термообработки уменьшаются до величин превышающих в два – три раза значения микротвердости покрытий на базе TiN, TiC, TiCN, ZrN, ZrC и т.п. Необходимо отметить термостабильность покрытия, сформированного при давлении азота в камере при формировании покрытия $2,4 \times 10^{-2}$ Па. Скорее всего, данное покрытие обладает низкими значениями внутренних напряжений, что и позволяет сохранять высокие прочностные характеристики при проведении термической обработки.

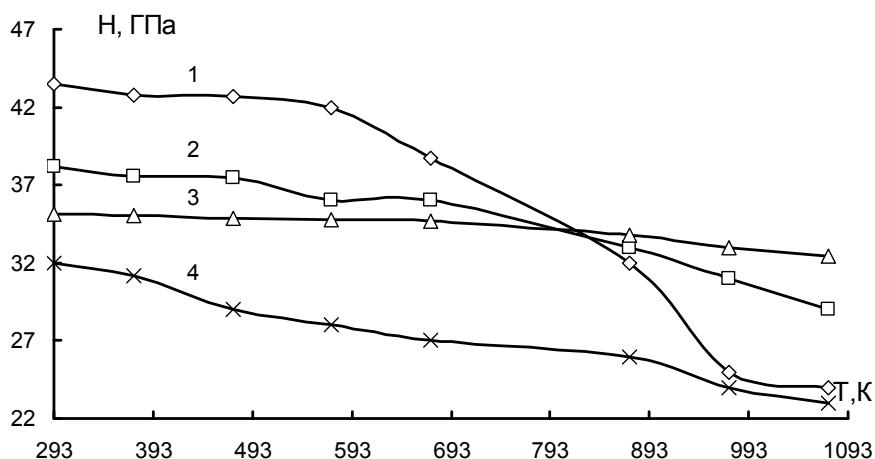


Рисунок 1 – Зависимость микротвердости покрытий AlTiN от режимов термообработки
 1 - давление азота в камере при формировании покрытия $7,5 \times 10^{-3}$ Па, 2 - давление азота $1,1 \times 10^{-2}$ Па;
 3 - давление азота $2,4 \times 10^{-2}$ Па; 4 - давление азота $3,2 \times 10^{-2}$ Па

В современном машиностроении широко применяются тонкопленочные покрытия различного функционального назначения, среди которых особую перспективу имеют покрытия на основе фторсодержащих полимеров и олигомеров [11, 12]. Такие покрытия, толщина которых не превышает 1 – 3 мкм, удается получать с помощью двух технологий: плазмохимической из активной газовой фазы и растворной, благодаря разработке растворимых фракций фторсодержащих олигомеров.

Одним из перспективных методов повышения стойкости инструмента является нанесение на его рабочую поверхность фторсодержащих поверхностно-активных веществ (ФТОР-ПАВ) из растворов эпиламов – эпиламирование [14, 15].

Особый интерес вызывают покрытия, сформированные по растворной технологии, не требующей специального дорогостоящего оборудования. Данные покрытия обладают комплексом уникальных эксплуатационных характеристик, т. к. молекулы олигомеров сочетают в себе высокую химическую стойкость (связи С–F), активность (химически активные концевые функциональные группы), гибкость и подвижность (наличие в структуре молекулярной цепи эфирных связей и сравнительно невысокая молекулярная масса макромолекулы) [10, 13].

Наиболее эффективными покрытиями, с точки зрения износостойкости и минимального коэффициента трения, состоящие из твердой подложки, воспринимающей нагрузку, и сравнительно мягкого поверхностного слоя с высокой способностью к передеформированию без разрушения. В качестве такого слоя могут быть использованы пластичные материалы: медь, политетрафторэтилен, полиэтилен, наносимые методами плазмохимической обработки или другими методами, применяющимися, например, в технологии переработки пластических масс.

В работе [11] рассмотрены вопросы формирования фторсодержащих олигомерных покрытий на алмазоподобных подложках, в том числе после проведения термообработки. Установлено, что нанесение фторсодержащих олигомеров на поверхность нанокomпозиционных покрытий с последующей термообработкой также приводит к изменению содержания нанкомпозиционных частиц в структуре покрытия. Вышеприведенные структурные, морфологические и энергетические изменения, наблюдаемые в алмазоподобных покрытиях, должны приводить к существенным изменениям в механических характеристиках данных покрытий, что и подтверждается результатами измерений микротвердости алмазоподобных покрытий, приведенных на рисунке 2.

Формирование данных слоев фторсодержащих соединений на подложках AlTiN, приводит к увеличению прочностных характеристик покрытий. Данный эффект объясняется хемосорбцией ФСО к интерметаллической подложке. Термообработка композиционных покрытий на базе алтинов и фторсодержащих олигомеров, при невысоких температурах термо-

обработки приводит к протеканию процессов, характерных для формирования покрытий ФСО как на металлах, так и на алмазоподобных подложках.

При температурах свыше 573 К должна протекать процесс деструкции данных фторорганических покрытий с поверхности подложки. Однако, при температурах обработки свыше 573 К наблюдается эффект увеличения микротвердости, что скорее всего объясняется образованием соединений на базе фторидов металлов (рис. 3).

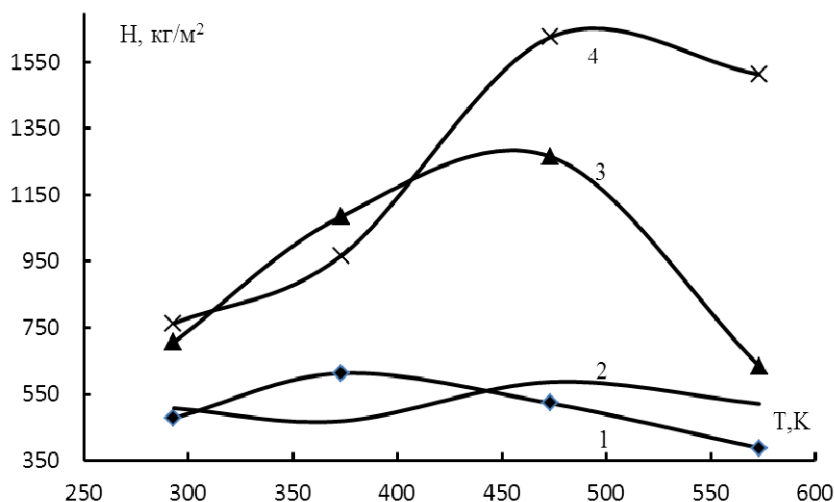


Рисунок 2 – Значения микротвердости (кг/м²) алмазоподобных покрытий [11]
1, 3-исходные образцы ; 2, 4-образцы, модифицированные фторсодержащим олигомером Ф1;
1, 2- образец №1; 3, 4-образец №2

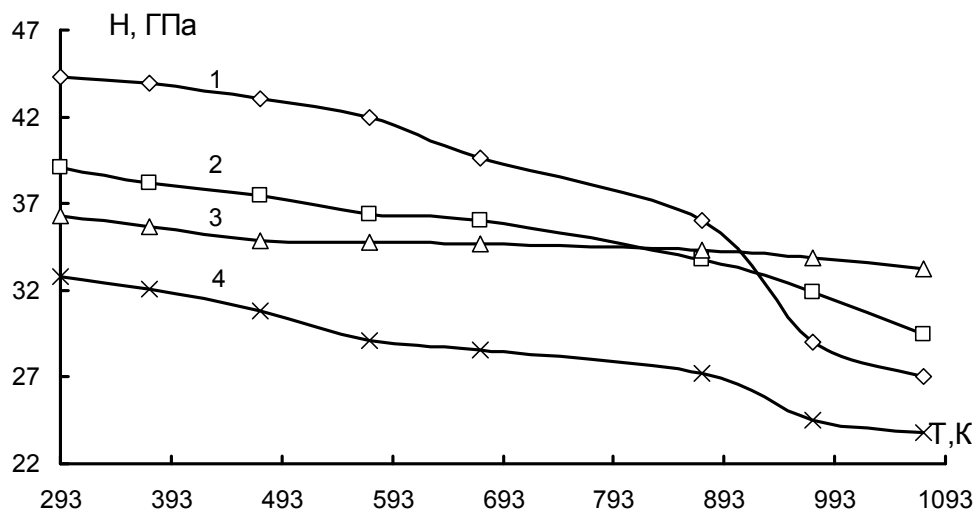


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости покрытий AlTiN, обработанных 5 слоями фторсодержащих олигомеров от режимов термообработки:
1 - давление азота в камере при формировании покрытия $7,5 \times 10^{-3}$ Па; 2 - давление азота $1,1 \times 10^{-2}$ Па;
3 - давление азота $2,4 \times 10^{-2}$ Па; 4 - давление азота $3,2 \times 10^{-2}$ Па

Изменение физико-механических характеристик поверхностных слоев алтинов при обработке фторсодержащими олигомерами и последующей термообработке, сопровождается изменением поверхностной энергии (табл. 1 и 2).

Таблица 1 – Зависимость значений поверхностной энергии от количества слоев фторсодержащих олигомеров, сформированных на подложке AlTiN (давление азота в камере при формировании покрытия $2,4 \times 10^{-2}$ Па)

Характеристика	алтин	алтин+ФСО 1 слой	алтин+ФСО 3 слоя	алтин+ФСО 5 слоев	алтин+ФСО 7 слоев
Угол смачивания вазелинового масла, град	27,00	68,00	64,00	67,00	67,00
Угол смачивания водой, град	80,00	60	65	65	63
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	56,73	41,24	43,15	41,72	41,72
Работа адгезии воды, мДж	84,46	107,94	102,37	102,37	104,62
Дисперсионный компонент поверхностной энергии	0,56	44,98	31,56	34,58	38,18
Полярный компонент поверхностной энергии	40,99	142,67	117,55	121,31	129,22
Поверхностная энергия, мДж/м ²	41,56	187,66	149,12	155,90	167,42

Таблица 2 – Зависимость значений поверхностной энергии от режимов термообработки фторсодержащих олигомеров, сформированных на подложке AlTiN (давление азота в камере при формировании покрытия $2,4 \times 10^{-2}$ Па)

Характеристика	алтин+ Ф1 5 слоев 100 °С	алтин + Ф1 5 слоев 200 °С	алтин + Ф1 5 слоев 300 °С
Угол смачивания вазелинового масла, град	66,00	60,50	29,00
Угол смачивания водой, град	76,00	105,00	29,00
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	42,20	44,77	56,24
Работа адгезии воды, мДж	89,37	53,34	134,90
Дисперсионный компонент поверхностной энергии	16,57	1,38	56,51
Полярный компонент поверхностной энергии	79,57	8,80	206,27
Поверхностная энергия, мДж/м ²	96,14	10,18	262,79

В настоящее время интенсифицированы исследования по изучению тройных и более сложных соединений, которые обладают высокими по сравнению с бинарными соединениями физико-механическими характеристиками. Применение систем AlTiN (алтин) позволяет существенно увеличить термоокислительную стабильность при увеличении твердости, по сравнению с простым бинарным нитридом металла. Представлял интерес изучить триботехнические характеристики данных покрытий в зависимости от режимов формирования. На рисунках 4-8 приведены зависимости коэффициента трения соединений AlTiN от времени проведения фрикционного взаимодействия.

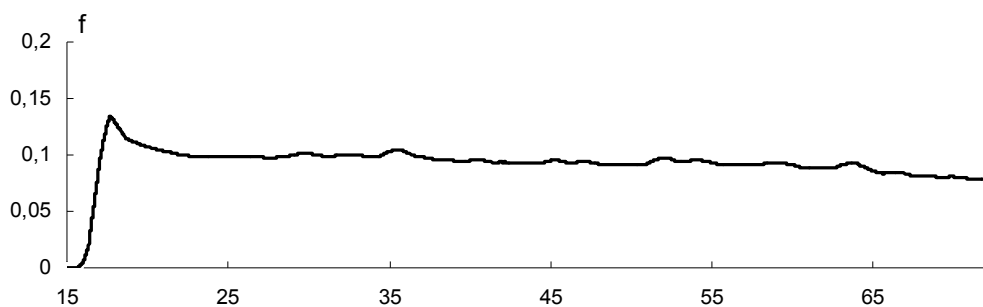


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента трения пары AlTiN-ШХ15 от времени фрикционного контакта. $V=0,1$ м/с, $N=20$ Н, схема испытаний «сфера-плоскость». Покрытие сформировано при давлении азота в камере $7,5 \times 10^{-3}$ Па

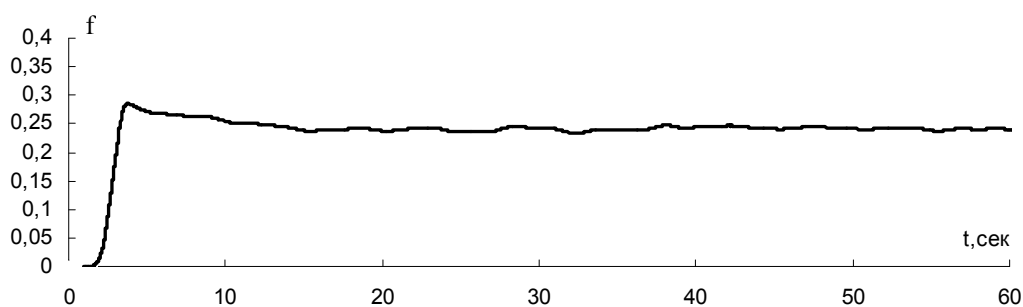


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента трения пары AlTiN-ШХ15 от времени фрикционного контакта. $V=0,1$ м/с, $N=20$ Н, схема испытаний «сфера-плоскость». Покрытие сформировано при давлении азота в камере $1,1 \times 10^{-2}$ Па

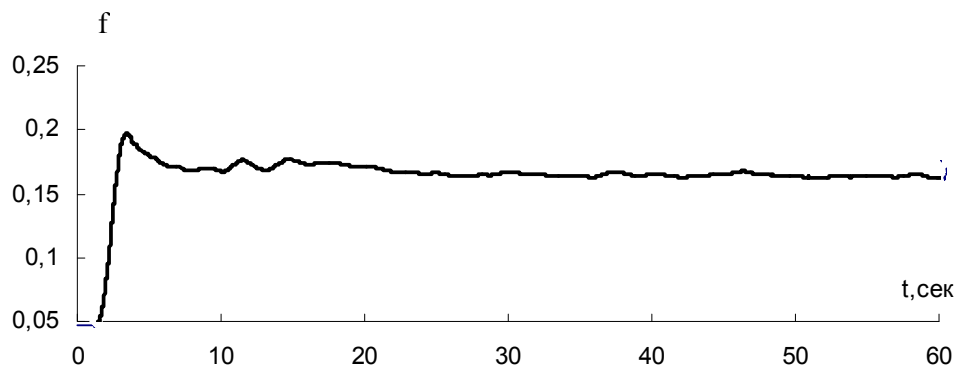


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента трения пары AlTiN-ШХ15 от времени фрикционного контакта. $V=0,1$ м/с, $N=20$ Н, схема испытаний «сфера-плоскость». Покрытие сформировано при давлении азота в камере $2,4 \times 10^{-2}$ Па

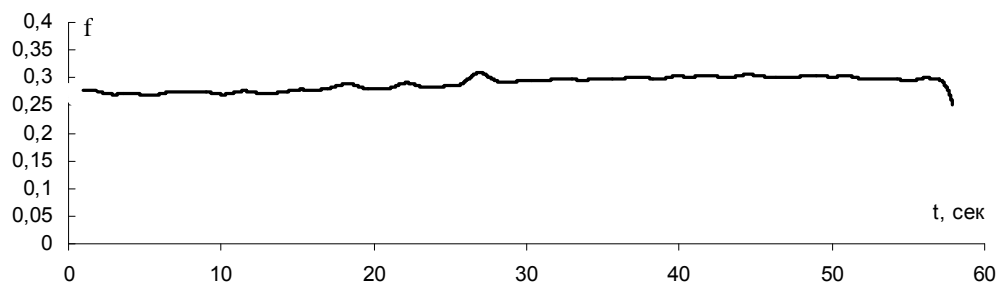


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента трения пары AlTiN-ШХ15 от времени фрикционного контакта: $V = 0,1$ м/с, $N = 20$ Н, схема испытаний «сфера-плоскость». Покрытие сформировано при давлении азота в камере $3,2 \times 10^{-2}$ Па

Таким образом, наиболее оптимальными режимами, при котором образуются антифрикционные слои с наиболее низким коэффициентом трения, являются условия, когда давление азота в камере составляет порядка $2,4 \times 10^{-2}$ Па (рис. 8).

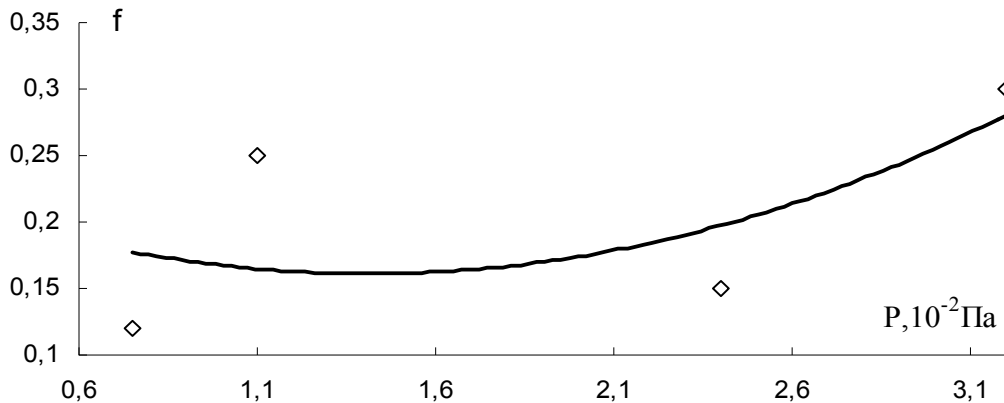


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента трения от давления реакционного газа в камере при формировании покрытия AlTiN

Исследовано влияние технологических параметров формирования покрытий на функциональные характеристики. Установлено, что покрытие представляет собой двухфазную систему. Количество второй фазы в матрице покрытия зависит от условий формирования покрытия и с увеличением давления в объеме рабочей камеры происходит уменьшение процентного содержания включений в покрытии.

Покрытия TiAlN могут успешно применяться в металлообработке при высоких скоростях резания металлов. Более того, сейчас формируются новые рынки наукоемкой продукции, в том числе и с применением нанотехнологий, имеющие большие перспективы развития [16]. Например, известно, что российский рынок режущего инструмента с многослойными покрытиями весьма активно заполняется продукцией ведущих мировых инструментальных фирм. При этом доля инструмента с покрытиями TiAlN неуклонно возрастает.

Перспективным направлением является применение многослойных покрытий для формирования гетероструктур. Формирование данных структур с применением органических соединений позволяет существенно улучшить сопротивление износу, уменьшить коэффициент трения, уменьшить окисление покрытый и изделий. Формирование мультислоев позволяет управлять концентрацией деформаций и условиями распространения нанотрещин. Поэтому, структура полимолекулярных слоев может оказывать действие как ингибитор распространения нанотрещин и дислокаций, увеличивать устойчивость трещины к ее росту

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nano-crystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications / G.S. Fox-Rabinovich [et al]. // Surf. And Coat. Technol. – 2004. – Vol. 177-178. – P. 800-805.
2. Mechanical properties and machining performance of Ti1-xAlxN-coated cutting tools / A. Hurling [et al] // Surface & Coatings Technology – 2005. – Vol. 191. – P. 384-392.
3. Получение нанокомпозитных покрытий на основе системы Ti-Al-Si-N с помощью двух магнетронов / А.В. Воронов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2009. - Т. 315. - № 2 – С. 147-150.
4. Effects of Al content on hardness, lattice parameter and microstructure of Ti1-xAlxN films / H. Kimura [et al]. // Surf. Coat. Technol. 1999. – V.120-121. – P. 438-441.
5. Лучанинов, А.А. Покрытия системы Ti-Al-N, нанесенные PVD методами / А.А. Лучанинов, В.Е. Стрельницкий // ФПП ФИП PSE. – 2012. – Т. 10. - № 1. – С. 56-98.
6. Self-organized nanostructures in the Ti-Al-N system / P.H. Mayrhofer [et. al.] // Appl. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 83. – P. 2049-2051.
7. Structure, mechanical and tribological properties of sputtered Ti1-xAlxN coatings with $0.5 \leq x \leq 0.75$ / K. Kutschej [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol. 200. – P. 2358-2365.

8. Nano-crystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications / G.S. Fox-Rabinovich [et al.] // Surf. And Coat. Technol. – 2004. – Vol. 177-178. – P. 800-805.
9. Structure, mechanical and tribological properties of sputtered Ti_{1-x}Al_xN coatings with $0.5 \leq x \leq 0.75$ / K. Kutschej [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol. 200. – P. 2358-2365.
10. Effect of aluminum concentration on friction and wear properties of titanium aluminum nitride films / H. Ohnuma [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2004. – Vol. 177-178. – P. 623-626.
11. Овчинников, Е.В. Формирования тонкопленочных покрытий при воздействии технологических факторов // Е.В. Овчинников // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научн. тр. / ДонНТУ. - Донецк, 2013. – Выпуск 1, 2 (45). – С. 197-205.
12. Рогачев, А.В. Тонкие вакуумные полимерные покрытия: Обзор. информ. / А.В. Рогачев, О.И. Палий, П.Д. Петрашенко / Гомельский политех. ин-т. - Гомель, 1988.-43 с.
13. Влияние строения фторсодержащих олигомеров на фрикционные свойства низкоскоростных узлов трения / В.А. Струк [и др.] // Трение и износ.-1996.- т.17, № 3.-С. 386-390.
14. Киричек, А.В. Технологическое обеспечение эффективности обработки эпиламированными быстрорежущими сверлами / А.В. Киричек, Е.А. Звягина // Известия Орел ГТУ Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии//2008 №2-3/270(545) С 14-21.
15. Киричек, А.В. Повышение стойкости инструмента для центробежного упрочнения / А.В. Киричек, М.Ф. Селеменев, М.Е. Вицен //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 4-2 (288). – 2011. – С. 66-68.
16. Степанова, Е.Ю. Маркетинг инноваций: проблемы и решения /Е.Ю. Степанова, Ю.С. Степанов // Экономические и гуманитарные науки. - №12 (239). – 2011. – С. 24-31.

Овчинников Евгений Витальевич

УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно
Кандидат технических наук, зам. декана факультета инновационных технологий
E-mail: ovchin_1967@mail.ru

Чекан Николай Михайлович

ГУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск
Кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией
E-mail: pec@bas-net.by

Акула Игорь Петрович

ГУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск
Кандидат технических наук, зав. лабораторией
E-mail: pec@bas-net.by

Y.V. AUCHYNNIKAU, N.M. CHEKAN , I.P. AKULA

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS COATINGS AIT_n FORMED BY PLASMA CHEMICAL DEPOSITION

The influence of technological parameters for the formation of coatings on functional characteristics. It was established that the coating is a two-phase system . Number of the second phase in the matrix of the coating depends on the conditions of coating formation and to increase the pressure in the working chamber volume decreases the percentage of inclusions in the coating. TiAlN coating can be successfully used in metal at high speed metal . One promising avenue is the use of multilayer coatings to form heterostructures .

Keywords : cover , aluminum, titanium nitride, structure, properties , plasma

BIBLIOGRAPHY

1. Nano-crystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications / G.S. Fox-Rabinovich [et al.] //Surf. And Coat. Technol. – 2004. – Vol. 177-178. – P. 800-805.
2. Mechanical properties and machining performance of Ti_{1-x}Al_xN-coated cutting tools / A. Hcrling [et al] // Surface & Coatings Technology – 2005. – Vol. 191. – P. 384-392.
3. Poluchenie nanokompozitnyh pokrytij na osnove sistemy Ti-Al-Si-N s pomoshh'ju dvuh magnetronov / A.V. .Voronov [i dr.] // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2009. - T. 315. - № 2 – S. 147-150.
4. Effects of Al content on hardness, lattice parameter and microstructure of Ti_{1-x}Al_xN films / H. Kimura [et al]. // Surf. Coat. Technol. 1999. – V.120-121. – P. 438-441.

5. Luchaninov, A.A. Pokrytija sistemy Ti-Al-N, nanosenyie PVD metodami / A.A. Luchaninov, V.E. Strel'nickij // FIP FIP PSE. – 2012. – T. 10. - № 1. – S. 56-98.
6. Self-organized nanostructures in the Ti-Al-N system / P.H. Mayrhofer [et. al.] // Appl. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 83. – P. 2049-2051.
7. Structure, mechanical and tribological properties of sputtered Ti_{1-x}Al_xN coatings with 0.5 ≤ x ≤ 0.75 / K. Kutschej [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol. 200. – P. 2358-2365.
8. Nano-crystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications / G.S. Fox-Rabinovich [et al.] // Surf. And Coat. Technol. – 2004. – Vol. 177-178. – P. 800-805.
9. Structure, mechanical and tribological properties of sputtered Ti_{1-x}Al_xN coatings with 0.5 ≤ x ≤ 0.75 / K. Kutschej [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol. 200. – P. 2358-2365.
10. Effect of aluminum concentration on friction and wear properties of titanium aluminum nitride films / H. Ohnuma [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2004. – Vol. 177-178. –P. 623-626.
11. Ovchinnikov, E.V. Formirovanija tonkoplenochnykh pokrytij pri vozdeystvii tehnologicheskikh fak-torov // E.V. Ovchinnikov // Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroenija: Mezhdunar. sb. nauchn. tr. / DonNTU. Doneck, 2013. – Vypusk 1, 2 (45). – S. 197-205.
12. Rogachev, A.V. Tonkie vakuumnye polimernye pokrytija: Obzor. inform. / A.V. Rogachev, O.I. Palij, P.D. Petrashenko / Gomel'skij politeh. in-t. - Gomel', 1988.-43 s.
13. Vlijanie stroenija ftorsoderzhashhih oligomerov na frikcionnye svojstva nizkoskorostnykh uzlov trenija / V.A. Struk [i dr.] // Trenie i iznos.-1996.- t.17, № 3.-S. 386-390.
14. Kirichek, A.V. Tehnologicheskoe obespechenie jeffektivnosti obrabotki jepilamirovannymi bystro-rezhushhimi sverlami /A.V. Kirichek, E.A. Zvjagina // Izvestija Orel GTU Fundamental'nye i prikladnye pro-blemy tehniki i tehnologii//2008 №2-3/270(545) S 14-21.
15. Kirichek, A.V. Povyshenie stojkosti instrumenta dlja centrobezhnogo uprochnenija / A.V. Kirichek, M.F. Selemenev, M.E. Vicen //Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - № 4-2 (288). – 2011. – S. 66-68.
16. Stepanova, E.Ju. Marketing innovacij: problemy i reshenija /E.Ju. Stepanova, Ju.S. Stepanov//Jekonomicheskie i gumanitarnye nauki. - №12 (239). – 2011. – S. 24-31.

Auchynnikaŭ Yauheni Vitalievich

Yanka Kupala Grodno State University. Grodno
Ph.D., deputy dean of the faculty of innovative
technologies
E-mail: ovchin_1967@mail.ru

Chekan Nikolai Mikhailovich

Physico-Technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk
Ph.D., head of laboratory
E-mail: pec@bas-net.by

Akula Igor Petrovich

Physico-Technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk
Ph.D., head of laboratory
E-mail: pec@bas-net.by

Т.В. ФЁДОРОВ

АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫМИ ДРОБНО-РАЦИОНАЛЬНЫМИ В-СПЛАЙНАМИ

Предлагается эффективная аппроксимация экспериментальных кривых упрочнения на основе дробно-рациональных В-сплайнов (NURBS-функций). Ограничиваясь лишь тремя опорными точками и кривизной, задаваемыми в сумме шестью параметрами, можно, тем не менее, получать хорошие приближения для широкого спектра экспериментальных кривых. Приводятся все необходимые формулы как для аппроксимирующей функции, так и для её производной.

Ключевые слова: теория пластичности, кривая упрочнения, аппроксимация, параметрическая кривая, дробно-рациональный сплайн.

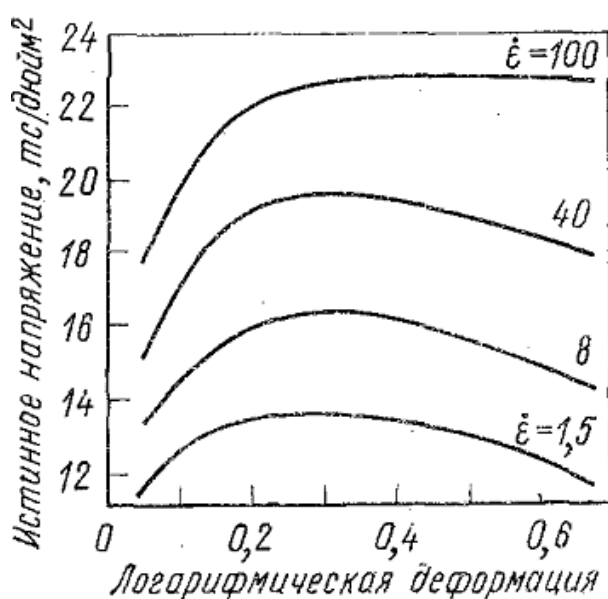


Рисунок 1 – Кривые напряжение сжатия - деформация для стали при 1000 °С (по данным Кука) [1]

Использование в прикладных задачах теории пластичности кривых упрочнения, полученных экспериментально для реального материала (рис. 1) [1, стр. 31, рисунок 1.12], сопряжено с рядом сложностей.

Для представления таких кривых при моделировании (численном или аналитическом решении) можно использовать различные аналитические выражения описывающие функциональную зависимость вида $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, S)$, в которой последняя составляющая S отвечает за структуру (химический, фазовый состав) и в свою очередь зависит от остальных параметров, т.е. $S = g(\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$. По причине сложности учета таких явлений в большинстве практических расчетов и моделей влияние S не учитывается.

В таблице 1 приводятся основные используемые при расчетах и моделировании техпроцессов зависимости $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$.

Таблица 1 - Основные используемые при расчетах зависимости $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$

Формула	Пояснение
$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T)$	Табличное задание
$\bar{\sigma} = Y(T, A) + H(T, A)\bar{\varepsilon}$	С линейным упрочнением
$\bar{\sigma} = Y + H\bar{\varepsilon}^n \dot{\bar{\varepsilon}}^m$	Со степенным упрочнением
$\bar{\sigma} = H(\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon})^n \dot{\bar{\varepsilon}}^m \exp(\beta / T_{abs})$	Модель Norton-Hoff Law
$\bar{\sigma} = Y + H\bar{\varepsilon}^n + c_1 \exp(-c_2 T + c_3 T \ln \dot{\bar{\varepsilon}})$	Модель Zerilli-Armstrong
$\bar{\sigma} = (Y + H\bar{\varepsilon}^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right) \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right)^\alpha (D - ET'^m)$ $T' = \frac{(T - T_{room})}{(T_{melt} - T_{room})}; D = D_0 \exp[k(T - T_b)^\beta]$	Основная модель Johnson&Cook
$\dot{\bar{\varepsilon}} = A\bar{\sigma}^n \exp(-\Delta H / RT_{abs})$	
$\dot{\bar{\varepsilon}} = A[\sinh(\alpha\bar{\sigma})]^n e^{-AH/RT_{abs}}$	

Приведённые зависимости не всегда воспроизводят экспериментальные кривые упрочнения с необходимой точностью. Возможен и другой способ описания, инженерный, при помощи полюсов, а именно – NURBS-кривыми или поверхностями, позволяя изменять кривизну, не изменяя опорные точки, что выгодно отличает от классической кривой Безье.¹

Базовая формулировка NURBS-кривой в многомерном пространстве записывается следующим образом:

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n h_i p_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n h_i N_{i,k}(u)} \quad (0 \leq u \leq 1) \quad (1)$$

где p_i – полюса (характеристические точки, к которым происходит привязка кривой) в многомерном пространстве; h_i – весовые коэффициенты; $N_{i,k}$ – полином Берштейна

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u-t_i)N_{i,k-1}(u)}{t_{i+k-1}-t_i} + \frac{(t_{i+k}-u)N_{i+1,k-1}(u)}{t_{i+k}-t_{i+1}} \quad \text{при } t_{k-1} \leq u \leq t_{k+1}, \quad (2)$$

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 & \text{при } t_i \leq u \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3)$$

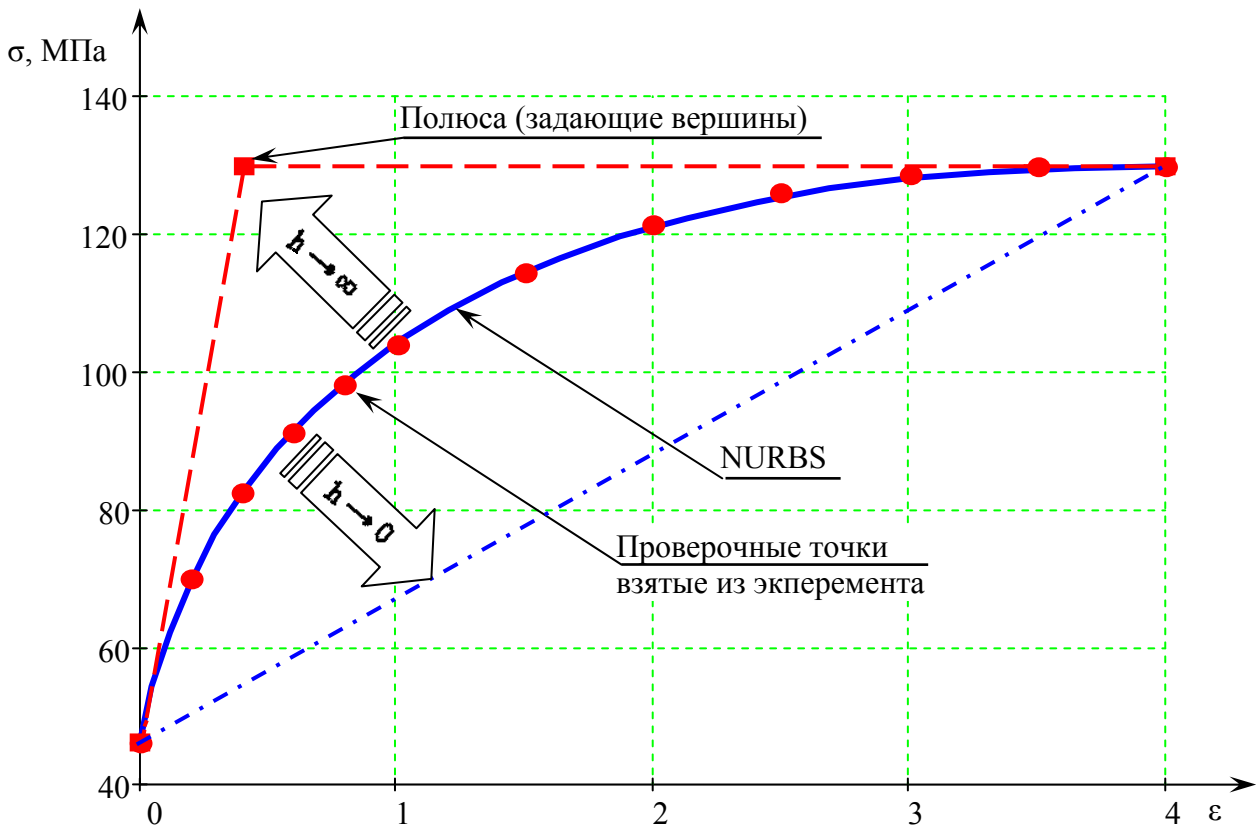


Рисунок 2 – Пример построения NURBS-кривой

Рассмотрим построение дуги, описывающей кривую упрочнения материала (рис. 2) [2, стр. 106 рисунок 5.20, кривая 9]. Для данной типовой кривой можно использовать описание

¹ В начале 60-х гг. Безье – сотрудник французской автомобильной компании «Рено» - предложил новую форму уравнения кривой и использовал ее в системе поверхностного моделирования UNISURF. Эта кривая получила название по имени ее автора. Строится по вершинам многоугольника, заключающего ее в себе. Вершины сопрягаются соответствующими функциями, подобно тому, как это делается в Эрмитовой кривой. Дальнейшее развитие кривая Безье получила в B-spline (1972г. Кокс и де Бур) и NURBS (nonuniform rational B-spline curve) рассмотренной в работе «Введение в использование сплайнов в компьютерной графике и геометрическом моделировании» Bartels R.H., Beatty J.C., Barsky B.A. 1987г.

NURBS-кривыми второго порядка, задавая всего по 3 точки. Т.о. порядок кривой $n = 2$, а $k = 3$ – число полюсов.

Влияние параметра h при изменении от 0 до ∞ показано на рисунке 2, стрелки указывают направление изменения кривизны дуги. Формулы (1-3) дадут следующую аппроксимирующую функцию:

$$\mathbf{P}(u) = \frac{h_0 \mathbf{p}_0 N_{0,3}(u) + h_1 \mathbf{p}_1 N_{1,3}(u) + h_2 \mathbf{p}_2 N_{2,3}(u)}{h_0 N_{0,3}(u) + h_1 N_{1,3}(u) + h_2 N_{2,3}(u)}, \quad (4)$$

где $N_{0,3}(u) = (1-u)^2$, $N_{1,3}(u) = 2u(1-u)$, $N_{2,3}(u) = u^2$.

$$\text{В итоге получаем } \mathbf{P}(u) = \frac{h_0 \mathbf{p}_0 (1-u)^2 + h_1 \mathbf{p}_1 2u(1-u) + h_2 \mathbf{p}_2 u^2}{h_0 (1-u)^2 + h_1 2u(1-u) + h_2 u^2} \quad (5)$$

Задаем полюса $\mathbf{p}(0, \sigma_0)$, $\mathbf{p}(\varepsilon_1, \sigma_1)$, $\mathbf{p}(\varepsilon_2, \sigma_2)$, здесь σ_0 - начальное напряжение текучести, ε_1 и σ_1 определяются как пересечение двух касательных проведенных из концов кривой, а ε_2 и σ_2 - предельные значения деформации и напряжения, соответственно.

Для простоты подбора значения h_i , подбираем только h_1 , а h_0 и h_2 полагаем равными 1, потому как значение имеет только их соотношение, т.о. весовые коэффициенты полюсов для кривой из рис. 2 $h^T = (1 \ 0.9 \ 1)$ принимаем и подставляем в выражение (5). Результат вычислений показан на рис. 2 (штриховая линия).

Следует отметить, что для хранения данной кривой необходимо всего шесть величин σ_0 , ε_1 , σ_1 , ε_2 , σ_2 и h_1 . Т.е. возможно создание справочника или базы данных кривых упрочнения занимающего минимальный объем данных при хорошей точности их описания.

Приведенные аппроксимации задают зависимость $\sigma(\varepsilon)$ неявным (параметрическим) способом. Однако, при необходимости можно найти функцию и явную зависимость $u(\varepsilon)$ из выражения (6):

$$A \cdot u^2 + B \cdot u + C = 0, \quad (6)$$

где $0 \leq u \leq 1$ и $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_2$, $A = 2[k - h_1(k - k_1)] - 1$, $B = -2[k - h_1(k - k_1)]$, $C = k$, $k = \varepsilon/\varepsilon_2$, $k_1 = \varepsilon_1/\varepsilon_2$, $k \in [0;1]$.

$$\text{Искомое значение } u = \frac{k - h_1(k - k_1) \pm \sqrt{h_1^2(k - k_1)^2 - k(k - 1)}}{2[k - h_1(k - k_1)] - 1}. \quad (7)$$

Решение u как функции $f(k, k_1, h_1)$ дает два корня. Графическое решение задачи выбора корня показало, что смысл имеет только левый корень, т.к. он дает решение в нужном диапазоне $0 \leq u \leq 1$. В самом деле, каждый корень порождает своё семейство кривых, расположенных между двумя ограничивающими кривыми.

Для правого корня получаем границы кривых

$$\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \xrightarrow{h \rightarrow 0} \frac{k + \sqrt{k - k^2}}{2 \cdot k - 1} \text{ и } \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \xrightarrow{h \rightarrow \infty} -\frac{\text{sign}(k - k_0) + 1}{2},$$

для левого

$$\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \xrightarrow{h \rightarrow 0} \frac{k - \sqrt{k - k^2}}{2 \cdot k - 1}, \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \xrightarrow{h \rightarrow \infty} \frac{\text{sign}(k - k_0)}{2} + \frac{1}{2}.$$

На рисунке 3 представлены два других семейства кривых $u(k)$. Как видно из рисунка 3, получаемые значения $u = f(h, k, k_1)$ при варьировании $h \in [0; \infty)$, $k_1 \in (0;1)$ и $k \in [0; k_1] \cup [k_1; 1]$ для левого корня соответствуют диапазону $0 \leq u \leq 1$ при любых сочетаниях h , k_1 и k . Получаемые кривые находятся между $u(h=0, k, k_1)$ и $u(h \rightarrow \infty, k, k_1)$, кружками показаны места пересечения $u(h=0)$ и $u(h \rightarrow \infty)$ для $k_1=0.1$ (рисунок 3, а) и $k_1=0.9$ (рисунок 3, б) соответственно.

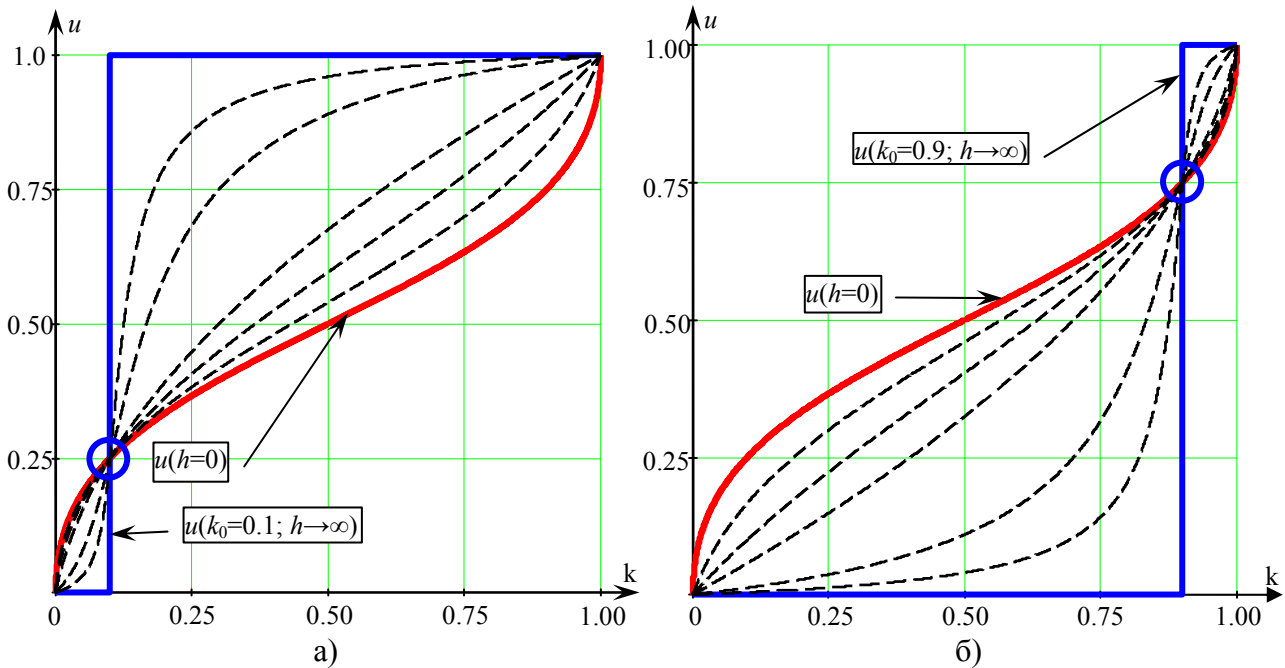


Рисунок 3 – Семейство кривых $u = f(h, k, k_1)$ при варьировании h и k , для левого корня
а) при $k_1=0.1$, б) при $k_1=0.9$.

Кроме того, при использовании NURBS-кривой возможно аналитическое определение ее производной $d\sigma/d\varepsilon$. Подставим в формулу (4) значения $h_0=1$ и $h_2=1$.

$$\text{В итоге получаем } P(u) = \frac{p_0(1-u)^2 + h_1 p_1 2u(1-u) + p_2 u^2}{(1-u)^2 + h_1 2u(1-u) + u^2}$$

$$\frac{P(u)}{du} = \frac{p_0 2(u-1)(u-h_1(u-1)) + p_1 4(1-2u) + p_2 2u(h_1 u - u + 1)}{((h_1-1)2u(1-u) + 1)^2}$$

Если известны, $\varepsilon = \varepsilon(u)$, $\sigma = \sigma(u)$ и $\frac{d\varepsilon}{du} \neq 0$, $\frac{d\sigma}{du}$, то

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma/du}{d\varepsilon/du} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_0)(h_1 - 1)u^2 + [\sigma_2 - 4\sigma_1 + \sigma_2(2h_1 - 1)]u + 2\sigma_1 - \sigma_0 h_1}{\varepsilon_2(h_1 - 1)u^2 + [\varepsilon_2 - 4\varepsilon_1]u + 2\varepsilon_1}$$

Вывод формулы $d\sigma/d\varepsilon$ не приводится из соображения экономии места.

В заключение хотелось бы отметить, что апробация предлагаемого подхода к описанию кривой упрочнения первого рода $\sigma = f(\varepsilon)$, используя NURBS-кривую для различных данных из источника [2], позволила утверждать о перспективности дальнейшего развития этого направления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П.Б. Меллор. Пер. с англ. /Пер. А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1979. - 567с.
2. Кроха, В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: справочник / В.А. Кроха. – М.: Машиностроение, 1980. – 157 с.
3. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) /К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.

Фёдоров Тимофей Васильевич

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орёл
Кандидат технических наук, доц. каф. «АВТОПЛАСТ»
302020, Наугорское шоссе, 29
E-mail: timofeyfedorov@rambler.ru

T.V. FEDOROV

AN APPROXIMATION OF EXPERIMENTAL STRAIN-STRESS CURVES BY NONUNIFORM RATIONAL B-SPLINE (NURBS)

An effective nonuniform rational B-spline (NURBS) approximation for experimental stress-strain curves is proposed. It is determined by only 6 parameters (3 poles and curve curvature), but, nevertheless, a good approximation for many elastoplastic materials is provided. The formulae for both approximation function and its derivative are deduced.

Keywords: *plasticity theory, stress-strain curve, approximation, parametric curve, nonuniform rational spline.*

BIBLIOGRAPHY

1. Dzhonson, U. Teoriya plastichnosti dlya inzhenerov /U. Dzhonson, P.B. Mellor. Per. s angl. /Per. A.G. Ovchinnikov. – M.: Mashinostroenie, 1979. - 567s.
2. Kroha, V.A. Uprochnenie metallov pri holodnoy plasticheskoy deformacii: Spravochnik /V.A. Kroha. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 157 s.
3. Li, K. Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE) /K. Li. – SPb.: Piter, 2004. – 560 s.

Fedorov Timofey Vasilyevich

State University – Education Science Production Complex,

Candidate of technical Sciences, associate Professor. KAF. «AVTOPLAST»

302020, Naugorskoe chose, 29, Orel

E-mail: timofeyfedorov@rambler.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК: 621.91

Н.В. КАНАТНИКОВ, А.С. ТАРАПАНОВ

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЗУБОСТРОГАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ СХЕМАМИ РЕЗАНИЯ

Рассмотрены результаты производственных испытаний резцов с дифференциальными схемами резания. Произведен сравнительный анализ процесса обработки профиля прямозубого конического колеса универсальными и специальными резцами, сравнение производилось по следующим параметрам: производительность процесса, точность и шероховатость получаемого изделия, стойкость инструмента.

Ключевые слова: зубострогание, прямозубое коническое колесо, дифференциальная схема резания.

Технологическое обеспечение качества выпускаемой продукции, повышение производительности, снижение себестоимости обработки являются одними из определяющих задач, стоящих перед отечественным машиностроением с целью обеспечения конкурентоспособности готовой продукции на внешнем и мировом рынках [1]. Несомненно, что решить эти задачи можно, лишь применяя инновационные технологические и технические решения, оборудование и инструменты [2]. Несмотря на серьезные проблемы в различных отраслях обрабатывающей промышленности резервы повышения эффективности многих традиционных технологических процессов еще далеко не исчерпаны.

Анализ методов обработки прямозубых конических колес показывает, что для повышения производительности либо увеличиваются скорости резания [3], либо используется специальный инструмент [3, 4]. Эти способы связаны с созданием новых конструкций станков и сложного инструмента. Использование специального, дорогостоящего оборудования, в условиях современного российского машиностроения, где большая часть предприятий выпускают серийную и мелкосерийную продукцию, зачастую является нецелесообразным. Поэтому обработка прямозубых конических колес в единичном и мелкосерийном производстве в большинстве своем производится на зубострогальных станках, работающих по методу обката.

При нарезании конических колес зубострогальные резцы воспроизводят впадину зуба производящего колеса (обрабатываются две стороны зуба) или зуб производящего колеса (обрабатываются две стороны впадины), и в процессе обработки резцы и нарезаемое зубчатое колесо получают относительное обкаточное движение, которое воспроизводит зацепление нарезаемого зубчатого колеса с производящим.

Обработка может производиться несколькими различными способами, один из которых заключается в нарезание зубьев без предварительного прорезания впадин на цельных заготовках. Данный способ обработки применяется в основном для мелко модульных зубчатых колес, когда предварительное нарезание затруднено. В подобных случаях ведут обработку универсальными резцами в два – три прохода, продвигая инструментальную бабку на столе вперед после каждого прохода. С целью улучшения качества нарезаемых колес, некоторого увеличения производительности и номенклатуры обрабатываемых изделий в подобных случаях применяют комбинированные резцы (рисунок 1), у которых спереди находится участок чистового нарезания с передней поверхностью, заточенной как у черновых резцов, а далее следует участок чистового нарезания, передняя поверхность которого затачивается под углом равным профильному углу нарезаемого зуба, как обычно [5]. Процесс обработки прямозубого конического колеса специальным резцом представлен на рисунке 2.

Подобная конструкция резцов вплотную подводит к решению задачи повышения эффективности процесса зубострогания прямозубых конических колес за счет использования

резцов с дифференциальной схемой резания. Зубострогальный резец с дифференцированной схемой резания - это такая модификация обычного резца, в результате которой он приобретает приведенную конструктивную подачу в виде разности размеров лезвия по ступеням.

Возможны два основных конструктивных типа резцов с дифференцированной схемой резания:

а) расстояние между передними поверхностями резцов (b) на 1 - 1,5 мм больше ширины нарезаемого венца (a), с тем, чтобы резцы вступали в работу последовательно, с некоторым перерывом во времени;

б) расстояние между передними поверхностями резцов меньше высоты нарезаемого венца и зависит от необходимого пространства для размещения стружки и прочности черновой ступени.

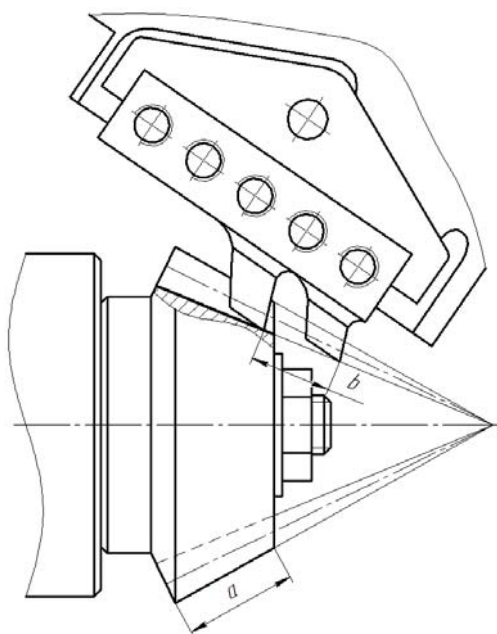


Рисунок 1 – Схема процесса зубострогания резцами с дифференциальной схемой резания

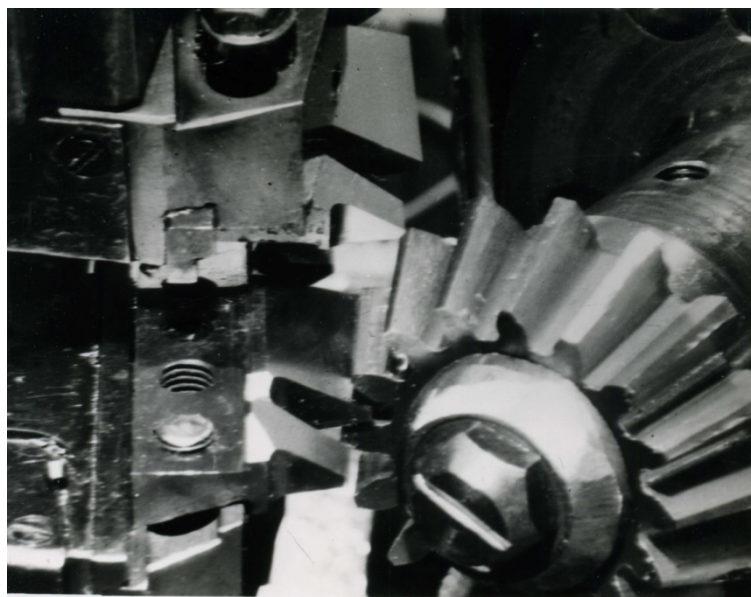
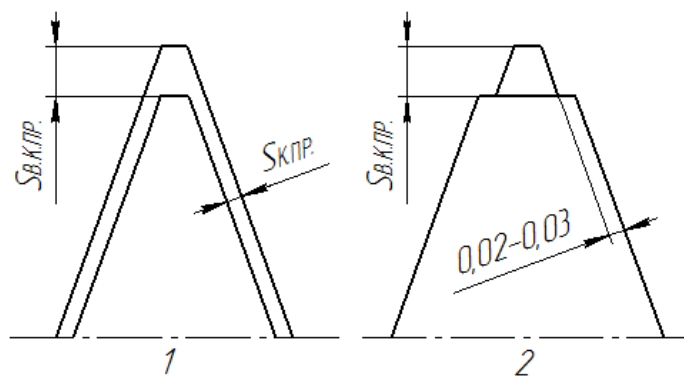


Рисунок 2 – Процесс обработки прямозубого конического колеса резцами с дифференциальной схемой резания

Второй конструктивный тип рационально применять при наличии станков повышенной жесткости, так силы резания при обработке таким инструментами могут несколько возрасти по сравнению с обычным вариантом, однако нагрузка на каждую ступень инструмента снижается примерно вдвое. Таким образом, увеличение окружных подач в данном случае, определяется лишь жесткостью применяемого оборудования.



*Рисунок 3 – Схемы разделения срезаемого слоя
1 – параллельная; 2 – распределенная*

Наиболее целесообразны две основные схемы разделения срезаемого слоя по ступеням инструмента (рис. 3):

- 1 - параллельная,
- 2 - распределенная.

При параллельной схеме разделение происходит по всему периметру срезаемого слоя, и чистовая ступень инструмента отделяет постоянный, определяемый приведенной конструктивной подачей слой металла.

При распределенной схеме резания первый зуб работает боковыми сторонами, а второй вершиной. Для того, чтобы исключить из работы боковые режущие лезвия второго зуба резца, между ним и боковыми режущими лезвиями первого зуба делается перепад в пределах: 0,02 - 0,03 мм.

Подобное разделение срезаемого слоя позволяет избежать контакта стружки от различных лезвий на передней поверхности и снижает силу резания и износ инструмента.

Принимая во внимание величины приведенных конструктивных подач, рекомендованных для обработки конических зубчатых колес, величину приведенной конструктивной подачи зубострогального резца с параллельной схемой резания в зависимости от абсолютной подачи, можно вычислить, пользуясь зависимостями [6]:

по вершинному режущему лезвию:

$$S_{КПР.В} = (1,2 \div 1,3) \frac{1}{T}, \quad (1)$$

по боковым режущим лезвиям:

$$S_{КПР.Б} = (0,9 \div 1,0) \frac{1}{T}, \quad (2)$$

где T - время обработки зуба конического колеса в мин.

Одновременными критериями оценки всякого металлорежущего инструмента являются стойкость, качество получаемые изделий и технологичность конструкции. Технологичность и стоимость инструмента определяется его конструкцией. Стойкость инструмента и качество изделий требует экспериментальной проверки. Под качеством обрабатываемых изделий в данном случае понимается точность зубчатого венца и шероховатость профиля.

Обработка конических зубчатых колес в условиях завода производится на станке модели 5С286П, имеющих определенный физический и моральный износ. Поэтому, несмотря на снижение усилий резания при обработке инструментами с дифференцированными схемами резания, величина подач в значительной степени лимитировалась жесткостью станка, оказывающей большое влияние на точность изделий и не позволяющей увеличить производительность процесса обработки.

В процессе производственных испытаний обрабатывались прямозубые конические колеса ($m = 6$ мм, $Z = 16$, ширина венца $B = 30$ мм, материал - сталь 45) при следующих режимах резания: время обработки одного зуба колеса – $T = 0,3$ мин/зуб; $0,48$ мин/зуб; $0,784$ мин/зуб, $V = 20$ м/мин. Нарезание зубьев деталей производилось с применением в качестве СОТС - машинного масла 3-5 л/мин.

Обработка зубчатых конических колес производилась следующими инструментами: зубострогальными резцами открытого типа с параллельным и односторонним дифференцированием срезаемого слоя и резцами закрытого типа с параллельным дифференцированием срезаемого слоя. На каждом из указанных режимов резания было нарезано по три изделия, причем приведенная конструктивная подача при этом соответствовала оптимальной (выражения 1, 2).

Исходя из условия наибольшей производительности обработки при улучшении точностных параметров изделий, была выбрана следующая подача: при обработке конических зубчатых колес резцами открытого типа с параллельным и распределенным дифференцированием срезаемого слоя и закрытого типа, с параллельным дифференцированием срезаемого слоя $T = 0,48$ мин/зуб.

Таким образом, сравнительные данные по режимам резания для базового и внедряемого варианта представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные данные по режимам резания

Инструмент	число проходов	круговая подача, мм/дв. ход	Скорость резания, м/мин	машинное время, мин
универсальные резцы	2	0,784	20	22
резцы с дифференциальными схемами резания	1	0,48	20	8,8

Для установления величины погрешностей обрабатываемых изделий, получаемых: по базовому и внедряемому варианту, проводились измерения в центральной измерительной лаборатории завода, Контрольная партия состояла из 100 изделий.

Контролю подвергались следующие параметры:

- пятно контакта;
- радиальное биение венца;
- шероховатость обработанной поверхности.

Результаты измерений представлены в виде полигонных кривых (рис. 4-5).

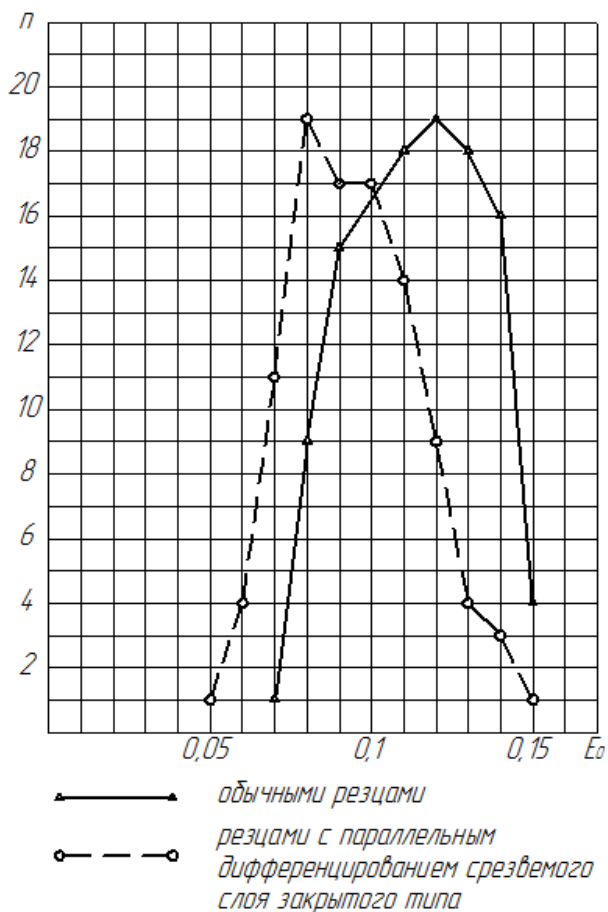


Рисунок 4.1 – Радиальное биение зубчатого венца конической шестерни

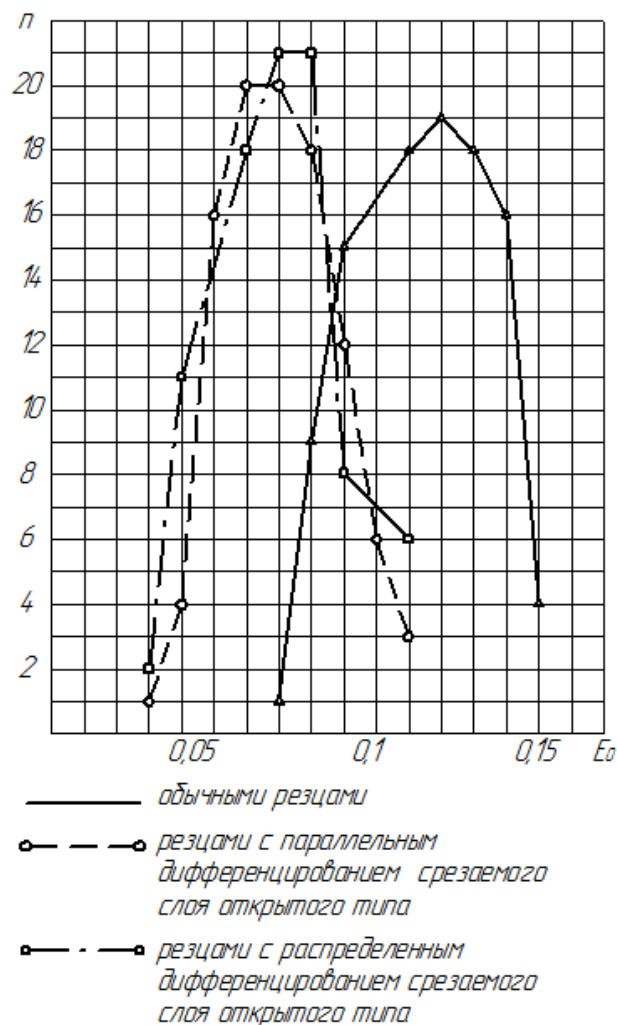


Рисунок 4.2– Радиальное биение зубчатого венца конической шестерни

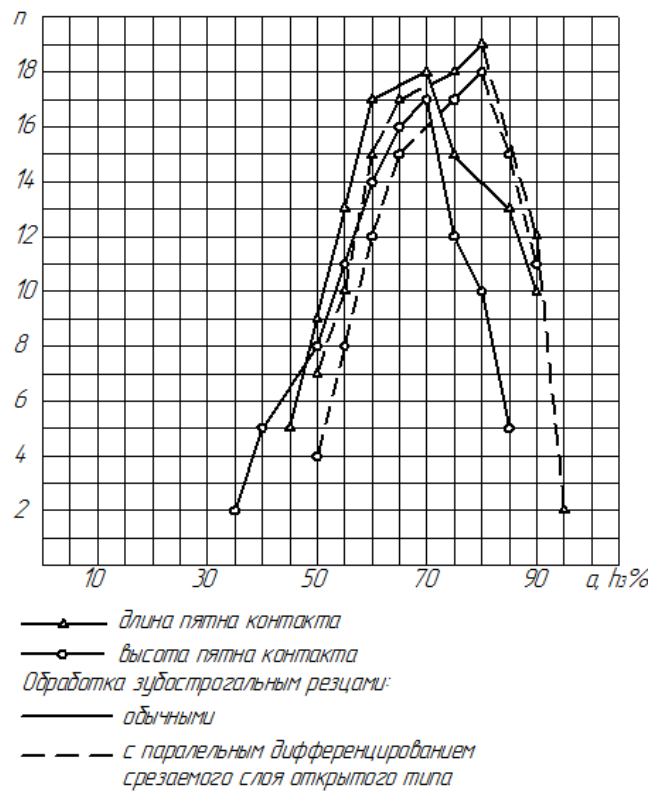


Рисунок 5 – Пятно контакта конической шестерни

Анализируя полученные кривые, можно сделать следующий вывод: конические зубчатые шестерни по измеряемым параметрам относятся к 8-ой степени точности ГОСТ 1643-81. Закрытый тип резцов увеличивает биение зубчатого венца на 10-12 % по сравнению с открытыми, а параллельная схема резания дает более стабильные показатели точности по сравнению с распределенной.

Шероховатость обрабатываемой поверхности оценивалась средней высотой неровностей. В качестве прибора для измерения высоты неровностей использовался двойной микроскоп МИС-11. Изучению подвергались отдельные, предварительно вырезанные зубья колес. Среднее отклонение профиля (Ra) конических шестерен, обработанных инструментами с дифференцированной схемой резания находится в диапазоне 1,25 – 1,8 мкм.

Величина износа инструмента с дифференцированными схемами резания определялась на станке без съема инструмента. В качестве измерительного инструмента применялась лупа Бринелля. Цена деления - 0,05 мм. Визуальная точность отсчета - 0,025 мм. Измерение величины износа проводилось для резцов на каждой ступени.

Анализ результатов измерения показывает, что стойкость инструментов с параллельной схемой резания увеличивается по сравнению с обычными в 1,2 -1,5 раза. Стойкость инструментов с распределенной схемой резания увеличивается по сравнению с обычными в 1,6-2 раза. Это объясняется тем, что при работе резца с дифференцированными схемами создаются благоприятные условия резания, влияющие на лимитирующую по стойкости чистовую ступень, которая при параллельной схеме резания имеет одинаковую толщину срезаемых слоев металла вдоль режущих лезвий, что обусловлено конструкцией инструмента. Деформация срезаемого в процессе резания слоя уменьшается, и износ по боковым режущим лезвиям выравнивается. При распределенной схеме резания геометрия слоев металла, срезаемых вершинным лезвием верхней ступени и боковыми режущими лезвиями нижней ступени, значительно упрощается, что и предопределяет увеличение стойкости инструмента в этом случае.

Анализируя результаты производственных испытаний зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания можно сделать следующие выводы:

1. Одним из путей повышения производительности обработки конических колес, является применение зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания;

2. Производительность зубообработки инструмента с дифференцированными схемами резания повышается в 2 - 2,5 раза за счет возможности использования больших подач и сокращения числа проходов, за которое нарезается изделие;

3. Для проектирования подобных инструментов необходимо точное определение геометрических параметров срезаемого слоя;

4. Благоприятные условия работы режущих лезвий инструментов с дифференцированными схемами резания увеличивают их стойкость: для инструмента с односторонней схемой резания в 1,5 - 2 раза для инструмента с параллельной схемой резания в 1,2 - 1,5 раза;

5. Снижение составляющих силы резания и более равномерное их перераспределение увеличивают точность нарезаемых изделий благодаря меньшему отжатию технологической системы в процессе резания. Лучшие показатели точности наблюдаются при работе инструментов открытого типа с параллельной схемой резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова, Е.Ю. Проблемы и тенденции в машиностроительном комплексе России и мировой финансовый кризис / Е.Ю. Степанова // Известия Орловского государственного технического университета // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. - № 2-3/274(560). – С. 143–148.

2. Степанова, Е.Ю. Высокие технологии в инновационной экономике / Е.Ю. Степанова, Л.И. Поландова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2007. - № 3. - С. 156-167.

3. Stadtfeld, H.J. CONIFLEX Plus Straight Bevel Gear Manufacturing / H.J. Stadtfeld //GEARSolutin. - Aug. 2010. - P. 40-54.

4. Carsten, Hunecke. The Road Leads Straight to Hypoflex / Hunecke Carsten //GEARTECHNOLOGY. - March / April 2010. - P. 54-57

5. Кедринский, В.Н. Станки для обработки конических зубчатых колес./ В.Н. Кедринский, К.М. Писманик. - М.: Машиностроение, 1967. – 588 с.

6. Канатников, Н.В. Зубострогальные резцы с дифференциальными схемами резания/ А.В. Канатников, Г.А. Харламов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. - № 3-2. - С. 136-141.

Тарапанов Александр Сергеевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УПНК», г. Орел, Россия

Доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

телефон: (4862)48-18-84

E-mail: tarapanov@yandex.com

Канатников Никита Владимирович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УПНК», г. Орел, Россия

аспирант

телефон: 8-920-0865782

E-mail: nkanatnikov@ya.ru

N.V.KANATNIKOV, A.S.TARAPANOV

PRODUCTION TESTING OF GEAR SHAPING CUTTERS WITH THE DIFFERENTIATED SCHEMES OF CUTTING

Presenting the results of production testing of gear shaping cutters with the differentiated schemes of cutting. Process of cutting straight bevel gears of special tools and universal tools was analyzed. The following criteria were used: process performance, accuracy, ROUGHNESS, tool life.

Keywords: gear shaping, bevel gear, differentiated schemes of cutting.

BIBLIOGRAPHY

1. Stepanova, E.Ju. Problemy i tendencii v mashinostroitel'nom komplekse Rossii i mirovoj finan-sovyj krizis /E.Ju. Stepanova // Izvestija Orlovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta // Funda-mental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2009. - № 2-3/274(560). – S. 143–148.

2. Stepanova, E.Ju. Vysokie tehnologii v innovacionnoj jekonomike / E.Ju. Stepanova, L.I. Polandova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - 2007. - № 3. - S. 156-167.
3. Stadtfeld, H.J. CONIFLEX Plus Straight Bevel Gear Manufacturing / H.J. Stadtfeld //GEARSolutin. - Aug. 2010. - P. 40-54.
4. Carsten, Hunecke. The Road Leads Straight to Hypoflex / Hunecke Carsten //GEARTECHNOLOGY. - March / April 2010. - P. 54-57
5. Kedrinskij, V.N. Stanki dlja obrabotki konicheskikh zubchatyh koles./ V.N. Kedrinskij, K.M. Pisma-nik. - M.: Mashinostroenie, 1967. – 588 s.
6. Kanatnikov, N.V. Zubostrogal'nye rezcy s differencial'nymi shemami rezanija/ A.V. Kanatnikov, G.A. Harlamov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2013. - № 3-2. - C. 136-141.

Tarapanov Aleksandr Sergeevich

FSEI HVT «State University – ESPC»

Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of engineering and Design software, machine-building productions»

Phone: (4862) 48-18-84;

E-mail: tarapanov@yandex.com

Kanatnikov Nikita Vladimirovich

FSEI HVT «State University – ESPC»

Postgraduate student

Phone: 8-920-0865782;

E-mail: nkanatnikov@ya.ru

УДК: 621.002(075.8)

В.А. КОМАРОВ, В.В. ПЛЕШАКОВ, А.А.САПРОНОВ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Рассмотрен вопрос повышения эффективности механической обработки высоко-твердых поверхностей деталей путем замены двух операций: предварительной, выполняемой режущим инструментом до термообработки и финишной, обычно шлифования или полирования, выполняемой абразивным инструментом на одну, выполняемую режущим инструментом, имеющим покрытие и некоторые геометрические особенности его режущих кромок. Показано, что фреза с геометрическими особенностями формы режущих кромок в отличие от фрезы с обычными прямыми зубьями может иметь подачу в 7,5 раз больше при обработке стали твердостью $HRC \geq 65$ и иметь высокую стойкость, до 10 км пути резания.

Ключевые слова: твердость, механическая обработка, стойкость, фреза, сталь.

Стали марок: У7, У8, У12, 9ХС, ХВГ, Х12 и другие, относящиеся к инструментальным углеродистым и легированным сталям, нашли широкое применение при изготовлении некоторых видов инструментов, валков прокатных станков, штампов и пресс-форм. При закалке твердость их достигает до HRC 68 и при этом получают малые коробления поверхностей. Этим обеспечивают высокую долговечность деталей, работающих на износ и контактную выносливость в условиях невысокого теплового нагрева. Ранее поверхности деталей, изготавливаемых из перечисленных марок сталей, после термической обработки (закалки до твердости HRC 65...68) подвергались шлифованию. Формообразование самих поверхностей деталей осуществляли режущим инструментом до операции термической обработки. В настоящее время при наличии высокоточных, динамически устойчивых, жестких станков, прецизионных режущих инструментов с керамическими или металлокерамическими покрытиями типа корунд и алюмонитрид наиболее эффективно формирование и отделку таких поверхностей делать после термообработки. Поскольку при определенных условиях [1-6] заданная точность и шероховатость поверхности до Ra 0,63... 0,16 мкм обеспечивается за один проход, выполняемый режущим инструментом.

В работе рассматривается влияние формы режущей кромки инструмента (в частности концевых фрез) на производительность резания высокотвердых материалов в свете закономерностей импульсной теории резания, выдвинутой в работах В.А. Комарова [1, 2].

Рассматривались два типа концевых фрез диаметром 8 мм ($Z_n = 4$), изготовленных из твердого сплава ВК6 (рис. 1, 2). На рабочую поверхность фрез наносилось покрытие - алюмонитрид титана Ti-NAMITE. Проводились испытания на износостойкость и расчет оптимальных режимов резания: частоты вращения фрезы – n (об/мин) и подачи на зуб – S_z (мм/зуб). Фреза второго типа соответствует конструкции фрез, предложенных фирмой Kenametal за исключением количества зубьев (рис. 2).

Испытания на износостойкость проводились путем фрезерования построчно плит из материалов У8 и Х12. Твердость поверхности материалов после закалки составляла HRC 65...68. Расчет оптимальных режимов резания осуществлялся по формуле (1), полученной для процесса резания как источника излучения тепла, имеющего дискретный, импульсный характер и которая учитывает изменение температуры ΔT на поверхности материала режущей кромки инструмента в соответствии с общей дифференциальной зависимостью, известной как формула Кельвина.

В работе [1] дан ее вывод для импульсного источника теплоизлучения в зоне резания:

$$\Delta T = \frac{0.85 \sigma_R m K_{sh}}{e H^2 / (4Wt) \sqrt{\pi \lambda_i C_p^{(i)} \rho_i l_x V}} \sum_{j=1}^i \frac{1}{\sqrt{j}}, \quad (1)$$

где $i=l_x V/(C*W*N)$;

V – скорость резания, м/с;

l_x – длина траектории резания, м;

t – время последствия дискретного - импульсного источника излучения энергии,

с; m – величина возможного сечения стружки в направлении подачи:

$$m=\Delta+ \delta_3+2\sqrt{(\delta_1^2+ \delta_2^2)},$$

δ_3 – биение режущих кромок, связанное с точностью изготовления инструмента, м;

δ_1 и δ_2 – радиальное и осевое биения режущих кромок, связанное с точностью и динамической устойчивостью шпинделя станка, м;

$C = (\pi^3(1-2\mu)\sigma_R)/(E-3(1-2\mu)\sigma_R)$ - постоянная физико-механических свойств обрабатываемого материала;

$\sigma_R = \sigma_B(1+1.35 \psi)$ – разрушающее напряжение, Па;

σ_B – предел прочности, Па;

ψ – относительное сужение поперечного сечения при разрыве;

K_{sh} – коэффициент пропорциональности теплопоглощения [1].



Рисунок 1 – Зубья фрезы прямолинейные по торцу с радиусом при переходе к линии цилиндра

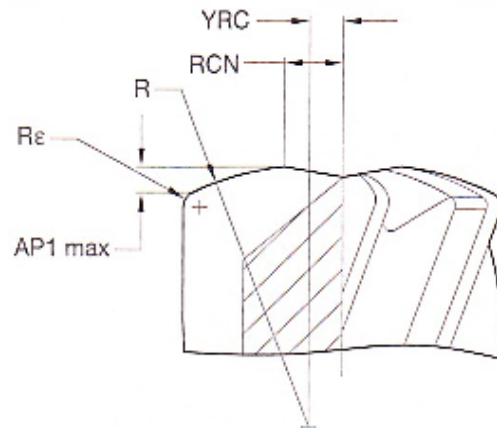


Рисунок 2 – Зубья фрезы на торце выполнены по радиусу R с радиусом R_{\square} при переходе к линии цилиндра

В процессе экспериментальных исследований за один проход удалялся припуск 0,2 мм. Скорость резания согласно расчетам по уравнению (1) в обоих случаях находилась в пределах 2 м/с. Подача на зуб или одну режущую кромку для фрезы, изображенной на рис.1, составляла 0.02 мм/зуб. Для фрезы, изображенной на рисунке 2, составляла 0,15 мм/зуб. В первом случае скорость подачи инструмента составляла 6 мм/с, во втором 60 мм/с, в 10 раз больше. При обработке стали У8 на одной из кромок фрез первой и второй конструкции появляется износ после прохождения суммарного пути резания, равного 12 км, сила резания увеличивается в два раза. При обработке стали Х12 путь резания до износа снижается до 10 км.

Анализ уравнения (1) позволил получить зависимость, которая объясняет причину возможного увеличения подачи в 7,5 раз, если зуб фрезы имеет форму, соответствующую рисунку 2.

$$K_z \leq \sqrt{\frac{2R}{\delta}}, \quad (2)$$

где δ – максимальная величина удаляемого за проход припуска, мм;

R- радиус режущей кромки по торцу, мм.

Подача инструмента составляет 0,15 мм/зуб при радиусе $R \geq 6$ мм. Соотношение (2) определяет распределение тепловых потоков из зоны резания по поверхности режущего лезвия фрезы и изменение направления вектора силы резания, которые снижают концентрацию тепла на поверхности и деформацию цилиндрического тела фрезы от снижения составляющей силы резания, направленной перпендикулярно оси вращения фрезы.

В заключение отметим, что металлообработку и неразрывно связанное с ней станкостроение образно называют становым хребтом экономики, они являются технологическим ядром современного производства, во многом определяют технический уровень развития промышленности в целом. Поэтому только применение инновационных решений, основанных на открытии новых фундаментальных явлений и закономерностей, может обеспечить технологический приоритет отечественному машиностроению [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров, В.А. Повышение эффективности технологических процессов на основе совершенствования обработки резания. – М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 164 с.
2. Комаров, В.А. Подтверждение импульсного характера разрушения материалов на основе металлофизического анализа образцов стружки / В.А. Комаров, А.Л. Абрамович, Т.Ф. Мещерякова, В.И. Мольков //Техника. Технология. Управление. - № 2. – 1992. - 13 с.
3. Кузнецов, В.Д. Физика твердого тела. Материалы по физики внешнего трения, износу и внутреннему трению твердых тел /В.Д. Кузнецов. - Т.4. - Томск: Полиграфиздат, 1947.
4. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов, М.: Машиностроение, 1975. – 334 с.
5. Shen, C.H. The importance of diamond coated tools for agile manufacturing and dry machining / C.H. Shen // Surface and coating technology 86-87- 1996. - P. 672 - 677.
6. Diniz, A.E., Micaroni R. Cutting conditions for finish process aiming: the use of dry cutting / A.E. Diniz, R. Micaroni / Int. J. MachineTools Manufact. - 42. - 2002. - P. 899-904.
7. Степанова, Е.Ю. Маркетинг инноваций: проблемы и решения / Е.Ю. Степанова, Ю.С. Степанов // Экономические и гуманитарные науки. – 2011. - № 12 (239). – С. 24-31.

Комаров Владимир Алексеевич

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики» (МГУПИ), г. Москва
Доктор технических наук, профессор
E-mail: komarovval1@rambler.ru

Плешаков Виктор Викторович

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики» (МГУПИ), г. Москва
Кандидат технических наук, профессор
E-mail: pleshakovvv@yandex.ru

Сапронов Андрей Александрович

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики» (МГУПИ), г. Москва
Аспирант
E-mail: sapronov_aa@yandex.ru

V.A. KOMAROV, V.V. PLESHAKOV, A.A. SAPRONOV

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MILLINGHARDENED STEEL PARTS

Considered the question of increase of efficiency of mechanical processing of extra-hard surfaces, by replacing two operations: - the provisional performed cutting tool to heat treatment and finishing, usually grinding or polishing performed abrasive tool on the one performed by a cutting tool with a cover and some geometrical features of its edges. It is shown that the cutter with the geometric features of the cutting edges in contrast to the cutter with the usual straight teeth can have a supply of 7.5 times more at the treatment of steel hardness HRC65 and have a high resistance, up to 10 kilometers edge cutter

Keywords: *hardness, mechanical treatment, resistance, cutter, steel.*

BIBLIOGRAPHY

1. Komarov, V.A. Povyshenie jeffektivnosti tehnologicheskikh processov na osnove sovershenstvovaniya obrabotki rezaniya. – M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2002. – 164 s.
2. Komarov, V.A. Podtverzhdenie impul'snogo haraktera razrusheniya materialov na osnove metallofizicheskogo analiza obrazcov struzhki/ Komarov V.A., Abramovich A.L., Meshherjakova T.F., Mol'kov V.I. //Tehnika. Tehnologija. Upravlenie. - №2. - 1992. - 13 s.
3. Kuznecov, V.D. Fizika tverdogo tela. Materialy po fizike vneshnego trenija, iznosu i vnutrennemu treniju tverdyh tel. T. 4. - Tomsk: Poligrafizdat, 1947.
4. Bobrov, V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov. - M.: Mashinostroenie, 1975. – 334 s.
5. Shen, C.H. The importance of diamond coated tools for agile manufacturing and dry machining / C.H. Shen // Surface and coating technology 86-87- 1996. - P. 672 - 677.
6. Diniz, A.E., Micaroni R. Cutting conditions for finish process aiming: the use of dry cutting / A.E. Diniz, R. Micaroni /. Int. J. MachineTools Manufact. - 42. - 2002. - P. 899-904.
7. Stepanova, E.Yu. Marketing innovaciy: problemy i resheniya / E.Yu. Stepanova, Yu.S. Stepanov // Ekonomicheskie i gumanitarnye nauki. – 2011. - № 12 (239). – S. 24-31.

Komarov Vladimir Alekseevich

Moscow state University of instrument engineering and Informatics,
Doc.Sc. tech., Professor
Phone: 495-387-6777
E-mail: komarovval1@rambler.ru

Pleshakov Viktor Viktorovich

Moscow state University of instrument engineering and Informatics
Can.Sc. tech., Professor
Phone 962-931-9464
E-mail: pleshakovvv@yandex.ru

Sapronov Andrey Aleksandrovich

Moscow state University of instrument engineering and Informatics
Postgraduate student
E-mail: sapronov_aa@yandex.ru

Е.Н. СЛОМИНСКАЯ, А.В. ЛОСЕВ, А.В. ФАДЕЕВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧИСТОТЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Приведены результаты исследований влияния шероховатости поверхностей, образующих кромки, на размеры радиуса скругления и отделки кромок на стойкость режущего инструмента, а также влияние загрязнений на долговечность агрегатов. Выполнен сравнительный анализ методов обработки кромок и определен наиболее рациональный для производства авиационной техники.

Ключевые слова: кромка, ликвид, заусенец, шероховатость поверхности, размерное скругление, прецизионная обработка.

Процесс создания конкурентно способной техники закладывается в процессе обоснования схемных, конструктивных, технологических решений, которые представляют собой синтез технологических систем, состоящих из множества элементов с противоречивыми свойствами, что предопределяет их оптимизацию. Оптимизация процессов, входящих в технологическую систему, возможна при известных условиях взаимного влияния и установленных соответствующих закономерностей, которым подчиняются эти влияния. Оптимальная технологическая система обладает суммарными свойствами, которые прогнозировано и устойчиво обеспечивают требуемое качество изделий с максимальным экономическим эффектом. Причем свойствами, присущими системе в целом, не обладают ее отдельные элементы, что позволяет выделить ее в виде целостного объекта. Технологическая система не сводится к простой совокупности составляющих элементов и рассматривая эти элементы в отдельности, без учета связей между ними, невозможно объективно оценить ее свойства в целом, а следовательно, нельзя оптимизировать качество продукции и затраты в производстве и эксплуатации.

Развитые в области машиностроения страны более четверти века назад вступили в этап перехода от разработки разрозненных прогрессивных технологий и техники для их реализации к целостным технологическим системам новых поколений. Формирование технологических систем на базе научно-технических достижений, охватывающих жизненный цикл изделий, выполняется исходя из поставленной цели и решаемых задач, обеспечивая оптимальное качество. Одним из наиболее важных свойств, характеризующих качество летательных аппаратов, является надежность, которая достигается комплексом технологических мероприятий.

Требуемого качества изделий отечественного машиностроения добиваются, главным образом, многостадийной доводкой технологических процессов по результатам изготовления, испытаний, эксплуатации изделий. При таком подходе сочетание характеристик элементов технологической системы носит случайный характер. Поскольку негативные влияния технологической наследственности сказываются в эксплуатации, вне производственного процесса, то это приводит к не прогнозируемым срокам освоения производства новых изделий, значительному удорожанию работ и в результате к потере конкурентной способности.

Рассмотрим один из наиболее важных элементов технологической системы, влияющий на надежность летательных аппаратов - промышленную чистоту прецизионных изделий и комплекс мероприятий по ее обеспечению.

Необходимость обеспечения промышленной чистоты прецизионных деталей объясняют такими функциональными причинами. Это предотвращение отказов гидравлических систем, связанные с заклиниванием распределительных и регулирующих устройств, а также повышенного износа ответственных деталей, происходящего при попадании в зазоры трущихся пар твердых металлических частиц [1], затруднение при сборке и позиционировании, снижение усталостной прочности и т.п. Частицы заусенцев или материала инструментов, попадая в

гидравлическую либо пневматическую систему, переносятся рабочей средой по всей системе, нарушают работу наиболее чувствительных элементов: манжетных уплотнений, золотниковых, плунжерных пар, подшипников, зубчатых передач, деталей замков, клапанов и др. Заусенцы вызывают завихрения в потоке газа или жидкости, а также ухудшение товарного вида изделий и ухудшают сцепление с лакокрасочными и другими покрытиями.

Известные традиционные способы чистового и отделочного шлифования также не лишены недостатков: они сопровождаются шаржированием обрабатываемой поверхности абразивом [2, 3], который в процессе эксплуатации может попадать в гидравлические системы, загрязняя их.

Исследование и опытно-конструкторские разработки в области технологической очистки поверхностей и кромок деталей широко проводятся в США, Англии, Франции, Японии, Китае, а также в нашей стране. По статистике до 50% всех отказов гидравлических систем самолетов, связанных с выходом из строя насосов, заклиниванием распределительных и регулирующих устройств, повышенным износом ответственных деталей происходит по причине технологических загрязнений. При обеспечении чистоты поверхностей деталей и рабочих полостей машин ресурс может быть увеличен в 2...3 раза [4]. Особенность этих технологий заключается в том, что эффективность проявляется при обработке 100% деталей, входящих в автономные гидро- или пневмосистемы. В настоящее время разработано около 120 отделочно-зачистных методов, что свидетельствует о важности и актуальности этого класса технологий и одновременно о сложности решения проблемы.

Влияние технологических загрязнений рабочих жидкостей в гидравлических системах на ресурс прецизионных агрегатов установлено в результате стендовых испытаний. На рисунке 1 показаны результаты испытаний двух типов агрегатов при использовании рабочих жидкостей различных классов чистоты. На рисунке 2 приведены допустимые загрязнения рабочих жидкостей 6-го класса чистоты частицами различной величины. Частицы размером менее 5 мкм не учитываются (ГОСТ 17216–71) при анализе чистоты рабочих жидкостей [4, 5]. Для контроля чистоты жидкости на предприятиях используют прибор ПКЖ–904А, в технической характеристике которого указаны контролируемые частицы в шести размерных диапазонах от 5 до 200 мкм и более. Однако стендовые испытания, выполненные в НИИДе, доказывают, что ресурс определяет не величина частиц, а их массовая концентрация и частицы менее 5 микрон существенно снижают ресурс гидротопливных агрегатов. Следует отметить, что если при удалении макрочастиц в условиях производства авиационных агрегатов традиционно используется ручной труд, то удаление микрочастиц является сложной технической проблемой, поскольку они не видимы невооруженным глазом. Причем их количество (см. рис. 2) значительно превышает крупные (более 20 мкм) ликвиды.

Исходя из физико-химического воздействия на материалы при обработке существующие методы зачистки, отделки и очистки кромок и поверхностей деталей можно разделить на пять групп: механические, химико-механические, химические, электрохимические, физические.

1. Механические методы, при которых удаление ликвидов осуществляется путем механического воздействия на обрабатываемые детали твердых тел и инструментов. К ним относятся: слесарные, лезвийные, абразивные методы, обработка давлением, ударные, галтовочные, центробежные, турбуляционные, вибрационные и робототехнические способы зачистки.

2. Химико-механические методы, при которых имеет место одновременное механическое воздействие инструмента и химическое воздействие внешней среды (жидкости). К этим методам относятся абразивная, гидродинамическая, галтовочная, центробежная, турбуляционная и вибрационная обработка с применением смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ).

3. Химические методы, при которых удаление ликвидов осуществляется за счет воздействия химически активной жидкой или газовой среды; они подразделяются на химические, галтовочно-химические, турбуляционно-химические и виброхимические способы.

4. Электрохимические методы, для которых характерно химическое воздействие жид-

кой среды и электрического тока, проходящего через электролит и материал детали. Они подразделяются на электрохимические с погружением, электрохимические локальные, гальванопокрытия, гальванические, виброэлектрические способы.

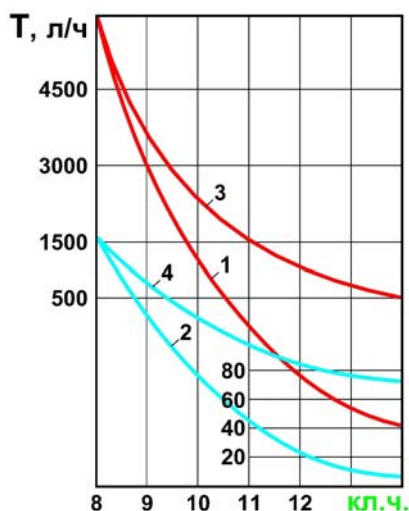


Рисунок 1 – 1,2 – наработка при наличии частиц менее 5 мкм

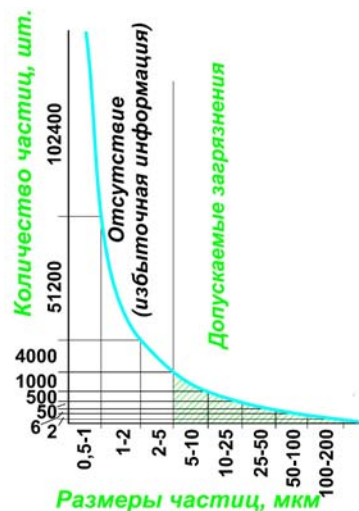


Рисунок 2 – Допустимое загрязнение рабочих жидкостей 6-го класса чистоты

5. Физические методы, при которых обработка осуществляется за счет физического воздействия на материал (ультразвуковых волн, электрических разрядов, электрогидравлических ударов и др). Их подразделяют на ультразвуковые, электроконтактные и импульсные (взрывной, электрогидравлический, термоимпульсный и др.) способы.

Несмотря на то, что известно множество методов, проблема высокоэффективной очистки рабочих полостей агрегатов и систем машин вследствие своей сложности пока не получила окончательного решения и остается весьма актуальной. Из всего многообразия технологий эффективно использовать в производстве агрегатов аэрокосмической техники можно только единицы, которые не образуют вторичных ликвидов, не изменяют геометрических размеров, не вызывают структурных изменений в материале деталей, обеспечивают экологическую чистоту, позволяют механизировать и автоматизировать процесс обработки. При выборе методов очистки деталей необходимо учитывать особенности конструкции, размеры ликвидов, свойства материала, серийность производства, наличие у предприятия банка отделочно-зачистных технологий.

Обеспечение промышленной чистоты агрегатов летательных аппаратов в производстве и эксплуатации в значительной степени зависит от определения источников загрязнения и механизма образования ликвидов. Известно, что после всех видов механической обработки резанием были проведены исследования поверхностей деталей, остаются заусенцы на кромках, а также микрозаусенцы и микрочастицы на поверхностях деталей [4-6]. Размеры металлических частиц и микрозаусенцев на поверхностях соизмеримы с величиной их шероховатости. Гранулометрический анализ твердых частиц, обнаруженных в полостях агрегатов и на поверхностях деталей, выявил, что доминирующими являются металлические. Разброс размеров металлических частиц от сотых долей до 200 мкм. Наиболее массовые частицы (более 90%) имеют размеры менее 5 мкм [4]. Установлено также, что массовое загрязнение рабочих жидкостей микрочастицами [5, 6] происходит в начальном периоде эксплуатации. При этом известно, что шероховатость трущихся поверхностей изменяется в результате приработки в начальный период эксплуатации машин и не соответствует шероховатости заданной в чертежах. В стандарте DIN 4776, действующего в западноевропейских странах, отражена причина изменения шероховатости. Согласно этому стандарту кроме параметров микрогеометрии поверхности контролируют еще и форму профиля. По кривой Аббота–Файерстоуна можно определить такие элементы профиля шероховатости: усредненную высоту выступов,

быстроизнашивающуюся в начальный период эксплуатации; глубину неровностей профиля поверхности, являющуюся основой профиля поверхности, длительное время находящуюся в работе и оказывающую основное влияние на срок службы изделия; усредненную глубину впадин, определяющих смазывающую способность поверхности. Математически кривая Аббота-Файерстоуна представляет собой кривую суммарной частоты ординат профиля [5].

Определение характеристик профиля шероховатости позволяет на стадии изготовления сформировать функционально необходимый микрорельеф поверхностей и кромок (получить износоустойчивый профиль) и таким путем избежать массового загрязнения продуктами износа гидравлических систем в начальной стадии эксплуатации.

Проблема высокоэффективной очистки деталей в мелкосерийном многономенклатурном агрегатном производстве, вследствие своей сложности, требует комплексного решения. При изготовлении сложнопрофильных корпусов гидравлических агрегатов (рис. 3) с применением обрабатывающих центров, использующих различные инструментальные системы, выбор метода удаления ликвидов осложняется тем, что точение, фрезерование и другие методы механической обработки образуют разные виды ликвидов, для удаления которых необходимо использовать до десяти способов зачистки и отделки кромок. Технологическая система, гарантирующая удаление ликвидов в условиях агрегатного производства, реализуется на базе термоимпульсного и ультразвукового методов [7]. Однако при использовании физических методов зачистки необходимо обеспечить стабильность и предсказуемость геометрических параметров ликвидов, образующихся на кромках и поверхностях.

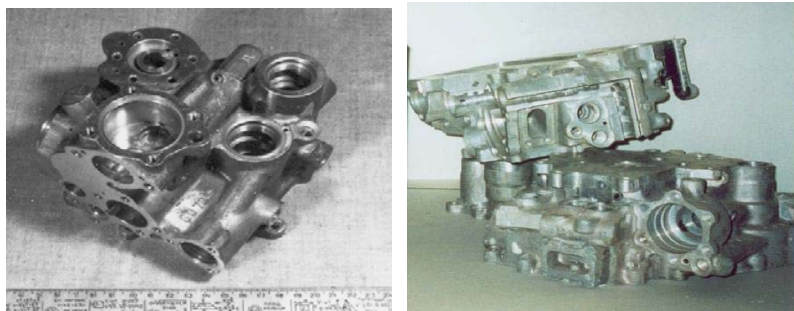


Рисунок 3 – Типичные корпуса в агрегатостроении

Рассмотрим влияние геометрии режущих кромок инструментов на образование ликвидов. Известно, что притупление инструментов ведет к увеличению толщины заусенцев, а микрорельеф режущих кромок формирует шероховатость обрабатываемой поверхности. Поскольку в литературных источниках приводятся противоречивые сведения по формированию режущих кромок и их влиянию на процесс резания металлов, стойкость инструментов и т. п., было исследовано качество формирования режущих кромок инструмента отечественных и ведущих зарубежных фирм. На рисунке 4 показаны типичные кромки после заточки в условиях заточного участка машиностроительного завода.

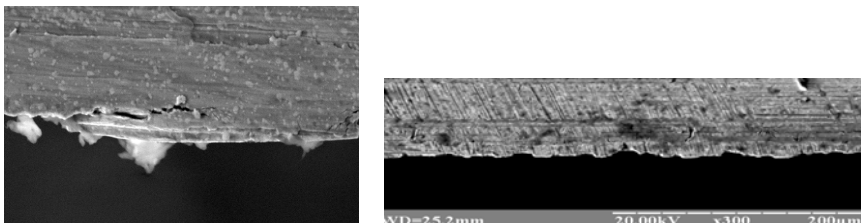


Рисунок 4 – Типичные кромки кромки реза кромки реза после заточки и зачистки.

На рисунке 5 показаны типичные режущие кромки после доводки мелкозернистым алмазным кругом и удаления микрозаусенцев щетками. Реальная кромка всегда представляет собой не линию, а переходную поверхность неправильной геометрической формы, которая суммирует погрешности формы и микрорельефа пересекающихся поверхностей.

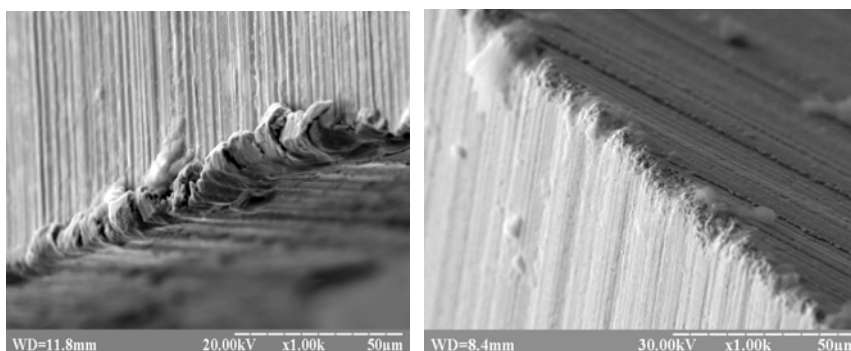


Рисунок 5 – Типичные режущие кромки без формирования радиуса

На рисунках 6-8 представлены результаты исследований кромок типичного инструмента (фрез, резцов) зарубежных фирм. Потребность в очистке и отделке кромок очевидна. Чтобы получить равномерное округление кромок по всему контуру детали, необходимо исключить погрешности формы, вызванные дефектами пересекающихся поверхностей. В многочисленных литературных источниках приведены фундаментальные исследования по инструментальным системам, включая формирование кромок лезвийного инструмента и их влияние на стойкость. На рисунке 9 показано влияние шероховатости поверхностей на дефекты кромок и на величину радиуса скругления для устранения этих дефектов.

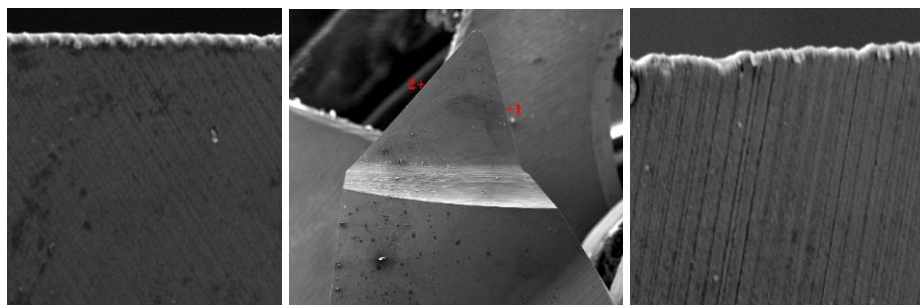


Рисунок 6 – Резец с режущими кромками

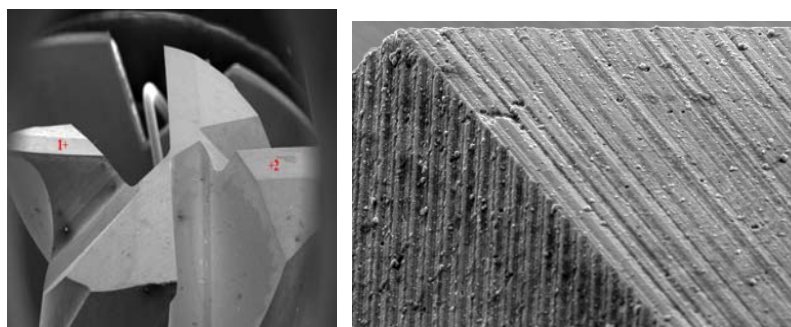


Рисунок 7 – Типичные кромки фрезы

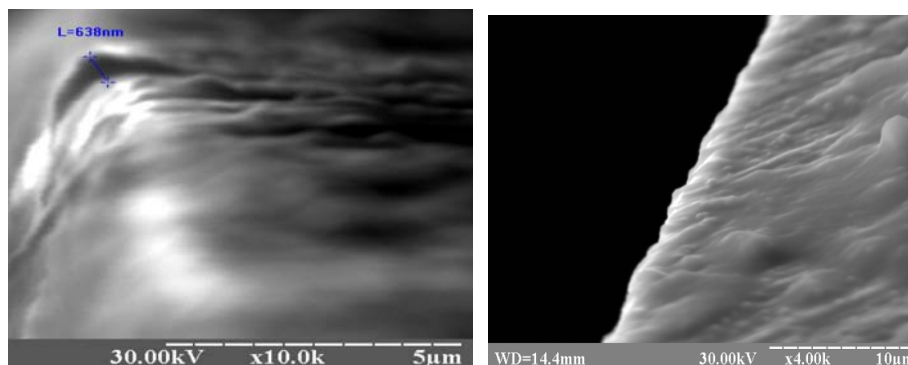


Рисунок 8 – Кромка фрезы с радиусом скругления ~1мкм

Радиус, равный трем микрометрам, недостаточен для устранения дефектов кромки. Чтобы получить бездефектное округление кромок по всему контуру детали (для данной ше-

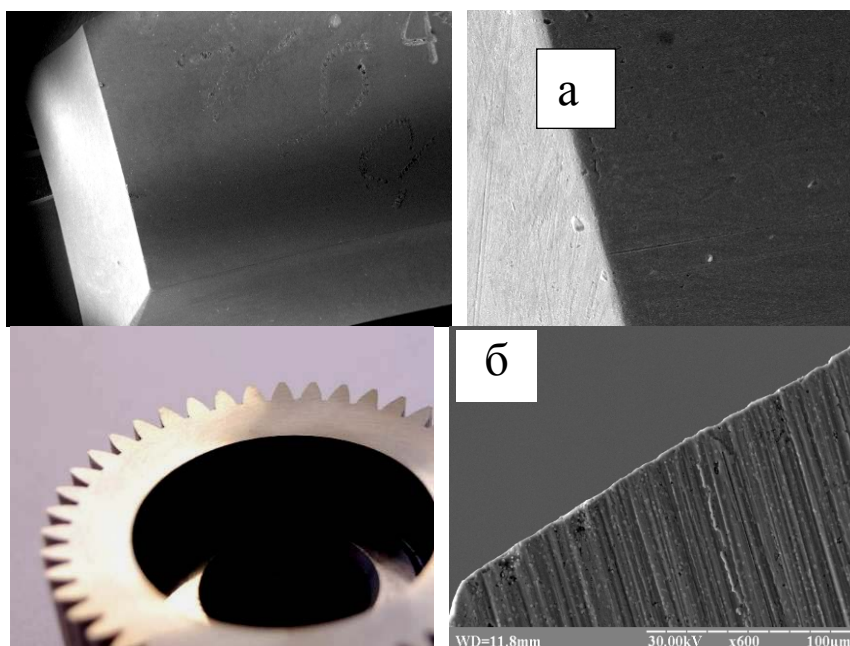


Рисунок 12 – Кромка реза после термоимпульсной обработки а) кромки реза, б) кромки долбяка

Изучение работ посвященных технологиям механической обработки показало, что образованию ликвидов мало уделяется внимания. В работах профессора Ю.М Барона и его учеников приведены исследования влияние геометрии режущей кромки лезвийных инструментов на процессы образования заусенцев на кромках деталей и при резании металлов. Их исследования свидетельствуют, что округление кромок на режущих инструментах из любого инструментального материала способно существенно (от 2 до 12 раз) повысить стойкость инструментов, улучшить качество поверхностей изделий, повысить надёжность износостойких покрытий.

Стойкость фирменного инструмента с радиусом кромки ~ 1 мкм (рис. 8), применяемого для обработки материалов твердостью около 60 единиц по Роквеллу в несколько раз выше стойкости фрез с несформированной кромкой (рис. 5, 7), но не согласуется с рекомендациями по оптимальному выбору радиусов округления, приведенными в выше упомянутых работах.

В работах профессора В.И. Петрова исследованы инструментальные системы, в которых рассмотрены факторы (более 50), влияющие на вибрацию режущих инструментов и их стойкость. В частности установлено, что наибольшая виброустойчивость реза обеспечивается при соотношении радиуса скругления режущей кромки и толщины глубины резания менее 0.1 и в этом случае округление кромок позволяет получить приращение стойкости реза от 1.5 до 4.0 раз.

В работах профессора М.М. Лама приводится гидродинамическая теория резания металлов. Исследования поверхностей образцов и деталей после различных видов механической обработки, выполненные нами, хорошо согласуются с исследованиями выше упомянутых авторов. Результаты исследований указанных авторов косвенно подтверждают, что физические процессы образования ликвидов при механической обработке можно объяснить законами гидродинамики следующим образом. Срезаемый слой материала разделяется на два потока клином режущей кромки, толщина которых обратно пропорциональна сопротивлению течению и прямо пропорциональна радиусу скругления кромки. Слой над резцом формируется в виде стружки, а микрослой между резцом и деталью - в виде микрочастиц из-за его дробления при вибрации системы СПИД.

Итак, высокое качество очистки поверхностей и кромок прецизионных изделий от ликвидов в производстве агрегатов необходимо для обеспечения долговечности и безотказности изделий в эксплуатации. Для этого процессы механической обработки должны разрабатываться с учетом образования заусенцев, микрочастиц, быстро изнашиваемой части микрорельефа поверхностей и минимизации затрат на их последующее удаление.

На стабильность размеров ликвидов при механообработке существенно влияет качество режущих инструментов - их стойкость, параметры режущих кромок, включающие шероховатость, радиус округления и др. Состояние режущих кромок также существенно влияет на прочность износостойкого покрытия инструментов. Если перед нанесением покрытия режущая кромка не скруглена, то при резании происходит выкрашивание износостойкого покрытия у кромки. Установленная закономерность влияния радиуса режущей кромки инструмента является связующим звеном интеграционной технологической системы очистки поверхностей и кромок деталей от ликвидов.

Технология формирования кромок режущего инструмента в равной степени относится и к обработке кромок золотниковых и плунжерных пар. Для минимизации вредного воздействия ликвидов на безотказность агрегатов кромки плунжера делают острыми, чтобы ими как скребком осадок сдвигался, а не проникал в зазор между корпусом и плунжером.

Установленные взаимовлияния элементов технологической системы позволяет определить метод и оборудование для удаления заусенцев, микрочастиц, быстро изнашиваемой части микрорельефа одновременно с внутренних и наружных поверхностей и кромок сложнопрофильных деталей.

Удаление ликвидов и размерное скругление кромок реализует термоимпульсный метод обработки. При использовании термоимпульсного метода обработки исключается субъективный фактор из технологической системы, что позволяет прогнозировать качество очистки от технологических загрязнений и надежность изделий в эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданов, А.А. Обеспечение качества гидротопливных агрегатов летательных аппаратов за счет новых технологий / А.А. Жданов // Технологические системы. – 2002. – №5. – С. 9 – 13.
2. Горбунов, Б. И. Исследование количественных характеристик шаржирования поверхности абразивом при бесцентровом шлифовании стальных деталей / Б.И. Горбунов, В.Я. Моисеев, Ю.С. Степанов // Известия вузов. Машиностроение. – 1984. - № 5.- С. 122 - 126.
3. Степанов, Ю.С. Ядерно-физические методы в исследованиях шлифованных поверхностей / Ю.С. Степанов // Разработка и внедрение средств автоматизации для технико-экономических разработок: Матер. науч.-техн. семинара. - Орел: ОП ВНТО им. акад. С. И. Вавилова, 1989. - С. 18 - 21.
4. Тимиркеев, Р.Г. Количественные зависимости влияния параметров механических примесей на показатели надежности золотниковых агрегатов гидротопливных систем / Р.Г. Тимиркеев, В.В. Плихунов, Н.Н. Губин //Авиационная промышленность. – 2000. - № 3. - С. 102-105.
5. Лосев, А.В. Необходимость использования отделочно-зачистных технологий в машиностроении / А.В. Лосев, О.А. Лосева, Ю.С. Дмитревская //Металлообработка. – СПб. - 2009. – Вып.1(49). – С. 2–9.
6. Лосев, А.В. Отделочно-зачистные технологии в производстве летательных аппаратов и в машиностроении / А.В. Лосев, В.А. Фадеев // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, 2007. – № 4 (40) – С. 6-12.
7. Фадеев, В.А. Обеспечение промышленной чистоты изделий машиностроения в производстве с использованием термоимпульсного метода. / В.А. Фадеев, А.В. Лосев, О.А. Лосева // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: Нац. техн. ун – та "ХПИ". – 2006. – Вып. 70. – С. 516 – 512.
8. Лосева, О.А. Проблема скругления кромок / О.А. Лосева// Сб. научн. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Сер. «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии» – 2010. - Вып. 45 – С. 122-128.
9. Лосев, А.В. «Технологическая система для удаления ликвидов с поверхностей деталей»/ А.В. Лосев, А.А. Коростелева, О.А. Лосева// Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – Вып. 4 (68) – X., 2011. – С. 126.
10. Лосева, О.А. Алгоритмизация автоматизированного определения режимов технологических процессов термоимпульсной обработки / О.А. Лосева, В.В. Шевель // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – Вып. 50 – Харьков, 2011. – С. 39 – 46.

Сломинская Елена Николаевна

Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана
Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Инженерная графика»
248000 г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, корп. 5
Тел.: +79109128620
E-mail: slominskaya_elena@mail.ru

Лосев Алексей Васильевич

Национальный аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского "ХАИ"
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17

Фадеев Андрей Валерьевич

ГП "Харьковский машиностроительный завод "ФЭД"
Кандидат технических наук, замдиректора по стратегическому развитию и качеству
Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 132

E.N. SLOMINSKAYA, A.V. LOSEV, A.V. FADEEV

**TECHNOLOGICAL SYSTEM FOR ENSURING INDUSTRIAL PURITY
PRECISION PARTS**

The article deals with the research results that are showing how roughness of surfaces, that form edges, influence upon spherical radius geometry, and edges roughness influence on a parts and assembly lifetime. Comparative analysis of edge treating methods is accomplished and the most rational method for aeronautical engineering is specified.

Keywords: edge, barb, burr, surface roughness, dimensional rounding, precision machining, thermal impulse process.

BIBLIOGRAPHY

1. Zhdanov, A.A. Obespechenie kachestva gidrotoplivnyh agregatov letatelnyh apparatov za schet novykh tehnologiy / A.A. Zhdanov // Tehnologicheskie sistemy. – 2002. – №5. – С. 9 – 13.
2. Gorbunov, B. I. Issledovanie kolichestvennyh harakteristik sharzhirovaniya poverhnosti abrazivom pri bes-centrovom shlifovanii stalnyh detaley / B.I. Gorbunov, V.Ya. Moiseev, Yu.S. Stepanov // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. – 1984. - № 5.- С. 122 - 126.
3. Stepanov, Yu. S. Yaderno-fizicheskie metody v issledovaniyah shlifovannyh poverhnostey / Yu.S. Stepanov // Razrabotka i vnedrenie sredstv avtomatizatsii dlya tehniko-ekonomicheskikh razrabotok: Mater. nauch.-tehn. seminar. - Orel: OP VNTO im. akad. S. I. Vavilova, 1989. - S. 18 - 21.
4. Timirkeev, R.G. Kolichestvennyye zavisimosti vliyaniya parametrov mehanicheskikh primesey na pokazateli nadezhnosti zolotnikovyyh agregatov gidrotoplivnyh sistem / R.G. Timirkeev, V.V. Plihunov, N.N. Gubin // Aviacionnaya promyshlennost. – 2000. - № 3. - S. 102-105.
5. Losev, A.V. Neobhodimost ispolzovaniya otdelochno-zachistnyh tehnologiy v mashinostroenii / A.V. Losev, O. A. Loseva, Yu. S. Dmitrevskaya // Metalloobrabotka. – SPb. - 2009. – Vyp.1(49). – S. 2–9.
6. Losev, A.V. Otdelochno-zachistnye tehnologii v proizvodstve letatelnyh apparatov i v mashino-stroenii / A.V. Losev, V.A. Fadeev // Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya. – Harkov, 2007. – № 4 (40) – S. 6-12.
7. Fadeev, V.A. Obespechenie promyshlennoy chistoty izdeliy mashinostroeniya v proizvodstve s ispolzovaniem termoimpulsnogo metoda. / V.A.Fadeev, A.V. Losev, O. A. Loseva // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Harkov: Nac. tehn. un – ta "HPI". – 2006. – Vyp. 70. – S. 516 – 512.
8. Loseva, O.A. Problema skrugleniya kromok / O.A. Loseva // Sb. nauchn. tr. Nac. aerokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «HAI». Ser. «Otkrytye informacionnye i kompyuternye integrirovannyye tehnologii» – 2010. - Vyp. 45 – S. 122-128.
9. Losev, A.V. «Tehnologicheskaya sistema dlya udaleniya likvidov s poverhnostey detaley»/ A.V. Losev, A.A. Korosteleva, O.A. Loseva // Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstrukciy letatelnyh apparatov. Sb. nauch. tr. Nac. aerokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «HAI» – Vyp. 4 (68) – Harkov, 2011. – S. 126.
10. Loseva, O.A. Algoritmizatsiya avtomatizirovannogo opredeleniya rezhimov tehnologicheskikh proces-sov termoimpulsnoy obrabotki / O.A. Loseva, V.V. Shevel // Otkrytye informacionnye i kompyuternye integrirovannyye tehnologii: sb. nauch. tr. Nac. aerokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «HAI» – Vyp. 50 – Harkov, 2011. – S. 39 – 46.

Slominskaya Elena Nikolaevna

Kaluga Branch of Moscow State Technical University named after N.E Bauman,
Ph.D, docent, Head of Department «Engineering graphics»
2-5, Bajenova Str., Kaluga, Russia, 248000
Phone: +79109128620,
E-mail: slominskaya_elena@mail.ru

Losev Aleksey Vasil'evich

National Aerospace University – Kharkiv Aviation Institute
Ph.D, Senior Researcher
132, Sumska Str., Kharkiv, Ukraine, 61070

Fadeev Andrey Valer'evich

State Enterprise "Kharkiv machine-building plant" FED
Ph.D, Deputy Director of Strategic Development and Quality
132 Sumska Str., Kharkiv, Ukraine

МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК687.022

Е.Л. МОСЬКИНА, Е.В. ПРОКОПОВА, А.А. МОСЬКИН, Н.В. ДЮЖИКОВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСКРОЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПОЛОТЕН С СОДЕРЖАНИЕМ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ВОЛОКОН

Физико-механические свойства текстильных полотен оказывают различное влияние на процесс настилки и технологию раскроя.

Ключевые слова: настилка, раскрой, жесткость, осыпаемость, сопротивление.

Стремление к индивидуальности, к личностному выражению заставляет людей находится в постоянном поиске нового в одежде. Ранее это достигалось цветовой гаммой и конструктивным членением, но мода неумолимо бежит вперед и параллельно развивается вместе с наукой, которая предлагает новые высокие технологии и ставит перед текстильной промышленностью очередные задачи. В наше экономически нестабильное время большое внимание уделяется конкурентоспособности ткани, где важную роль играет структура нитей, фактура полотен, их колористическое оформление и отделка.

Производство натуральных волокон с каждым годом сокращается, а производство синтетических, чтобы заполнить рынок конкурентоспособными тканями, развивается более высокими темпами. Наблюдая сырьевой «голод», современная экономика развивается в условиях ограниченности. Для отечественного текстиля это, прежде всего, ограниченность собственного сырьевого ресурса – доступных по цене и качественных натуральных волокон. «Ресурсный голод» сказывается на выпуске конечной продукции предприятиями швейной, трикотажной промышленности, где текстиль используется в качестве основного и вспомогательного материала. Поэтому доступность исходного сырья из синтетических волокон, меньшая трудоемкость их производства, разнообразие свойств и качеств, нашли свое применение в швейной промышленности. Синтетические волокна характеризуются высокой прочностью, водостойкостью, износостойкостью, эластичностью и устойчивостью к действию химических реагентов, сохраняют эти качества в тканях и улучшая тем самым их потребительские свойства, они постепенно заменяют недостаток натуральных волокон. На смену одним наименованиям и маркам синтетических тканей приходят другие – более современные, качественные, отвечающие требованиям времени. Рынок и потребитель диктует свои условия: максимально качественный товар за минимально возможную цену. Поэтому производитель находится в постоянном поиске – максимальное качество сырья по минимальной цене. Один из путей достижения данной цели – использование тканей, содержащих полиуретановые волокна (лайкру).

Особенности переработки таких тканей в подготовительно-раскройном производстве накладывают свои требования.

При разнообразном спектре методов раскроя, механический раскрой текстильных материалов имеет широкое применение из-за простоты изготовления режущего инструмента и осуществление процесса резания, возможности раскраивать одновременно большое количество полотен, и, главное, универсальности раскроя [1].

На швейных предприятиях для раскроя текстильных полотен широко применяются передвижные раскройные машины с вертикальным (прямым) ножом, отечественных и зарубежных фирм: «SL» SU LEE (Тайвань), «ZJ» ZOJE (Китай), «HF» (Польша), «KM» (Япония), «MP» (Россия), «GEM» (Венгрия), «CS» (Чехия) и стационарные раскройные ленточные

машины. Данные машины позволяют разрезать настилы значительной толщины (до 100 мм и более) и вырезать детали сложной формы.

Качество изделия закладывается уже на этапе раскроя текстильных материалов на детали. Раскрой полиуретановых полотен связан с рядом трудностей и недостатков. Ограниченно рассмотрены вопросы, рекомендуемые режимы обработки данных тканей, не оптимизированы режимы резания рабочего инструмента и его форма, не обоснованы технологические требования к процессу раскроя. Наличие лайкры в ткани накладывает особенности при раскрое и пошиве. Такие текстильные полотна при взаимодействии с режущим инструментом раскройной машины проявляют упруго эластичные свойства, что сказывается на точности кроя и, тем самым, требует корректировки технологических режимов. В результате чего частая заточка режущего инструмента, очищающая нож от налипания на рабочую часть продуктов деструкции материала, быстро изнашивает его и ведет к увеличению времени обработки, повышает трудоемкость изготовления кроя. Наблюдается брак по линии реза из-за относительного смещения слоев настила и вибрации раскройного оборудования.

Широкое использование нитей лайкры объясняется их свойствами. Это, в первую очередь, растяжимость и восстановление размеров нитей, которое повышает качество всех тканей и изделий одежды, придавая удобство и свободу движений, улучшая облегаемость, сохранение формы и устранение морщин [2].

На кафедре «Технология и конструирование швейных изделий» Госуниверситета - УНПК проводятся исследования в области технологии раскроя и пошива швейных изделий из материалов, содержащих полиуретановые волокна.

На качество вырезания влияют состояние режущего инструмента, степень его износа, поэтому весьма важным являются повышение стойкости режущего инструмента и его рациональное использования

Прочность инструмента его износостойкость зависит от самой структуры используемой стали. При раскрое происходит износ ножа. Особенно это наблюдается при раскрое синтетических тканей, так как из-за трения нож нагревается происходит оплавление ткани и налипание на нож элементов деструкции материала, из-за чего нож периодически необходимо подтачивать. Подтачивание не только заостряет кромку ножа, но и убирает деструкцию. В результате происходит уменьшение ширины ножа, его ослабление, а следовательно увеличивается амплитуда его колебаний, что влечет за собой появление погрешности в размерах деталей кроя. Поэтому ставится задача в ликвидации явления спекаемости за счет использования современных обработок используемых в инструментальном хозяйстве.

Поверхностный слой детали - это слой, у которого структура, фазовый и химический состав отличаются от основного металла, из которого сделана деталь.

Толщина и состояние слоев может меняться в зависимости от состава материала, метода обработки, условий эксплуатации.

Для повышения эффективности обработки применяются методы, связанные с улучшением свойств инструментального материала, изменением состава и свойств поверхностного слоя инструмента, нанесением тонкопленочных покрытий, снижении шероховатости рабочих поверхностей и улучшение условий эксплуатации инструмента [3, 4].

Существует несколько методов увеличения срока эксплуатации режущего инструмента к ним относятся керамическое, алмазное покрытие, ионное азотирование. Применение этих методов нерационально из-за хрупкости материала, или его высокой стоимости, или необходимость применения спецоборудования.

Наиболее перспективным методом повышения стойкости инструмента является нанесение на его рабочую поверхность растворов эпиламов – эпиламирование [5].

При проведении исследований, необходимо построение регрессионной модели, характеризующей процесс раскроя с учетом исследования влияния факторов, влияющих на точность кроя, которая с помощью математической модели процесса раскроя, связывает погрешность детали и значения факторов, влияющих на нее.

Учитывая, что выходной параметр процесса раскроя – погрешность раскроя (величина отклонения от линии контура), представляющая собой величину случайную, а входные параметры – величины варьируемые, то для решения данной задачи необходимо построить регрессионную модель, полученную при активном эксперименте.

Для построения модели, определяющей оптимальные значения параметров раскроя (высоту настила и натяжение ленточного ножа), были выбраны факторы, уровни варьирования (качественное и количественное состояние факторов) и нулевая точка.

Проведенный эксперимент показал, что при раскрое обеспечить допуск по погрешности формы криволинейного контура труднее, чем допуск по погрешности размера детали. Поэтому режим раскроя, обеспечивающий требования к погрешности формы криволинейного контура, обеспечит также выполнение требований к погрешности размера детали. Учитывая данное обстоятельство, ограничимся построением регрессионной модели, определяющей погрешность формы при раскрое криволинейных срезов. При выкраивании деталей на ленточной машине, погрешность формы деталей кроя зависит от высоты настила, радиуса кривизны, длины дуги среза, способа скрепления полотен, способа задания контура детали и от натяжения ножа [6]. Так как вид контура влияет на величину погрешности, то для каждого типа контура (вогнутого и выпуклого) необходимо построить отдельную модель. Модель для определения погрешности целесообразно было представить с включением факторов, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы, влияющие на погрешности формы контуров при раскрое

Порядковый номер модели	Тип криволинейного контура	Факторы					
		Варьируемые			Фиксированные		
		Высота настила	Радиус кривизны	Длина дуги	Ширина ножа, мм	Скорость ножа, м/с	Натяжение ножа, Н
1	Выпуклый	X ₁	X ₂	X ₃	15	20	270
2	Вогнутый	X ₁	X ₂	X ₃	15	20	270

Согласно предложенным моделям, были определены уровни варьирования следующих факторов: высоты настила во всех моделях, радиуса кривизны срезов, длины дуги срезов.

Для определения верхнего и нижнего уровня высоты настила по каждому из вариантов технологического процесса раскроя было проанализировано 40 карт раскроя тканей с полиуретановыми волокнами при производстве блузок. Анализ карт раскроя показал, что верхний предел высоты настила составил 58 полотен. При раскрое на СРЛМ, технические условия предусматривают деление заготовки детали по высоте на две части и раскрой каждой части в отдельности, то с учетом интервала, нижний предел составит 14 полотен (при этом количестве полотен погрешность размера находится в пределах допуска).

В результате эксперимента получены диаграммы точечного распределения отклонений размеров кроя от номинала по каждому уровню варьирования, которые представлены на рисунках 1-3.

В процессе проведения исследований можно сказать, что с доверительной вероятностью $P = 0,95$ значения размера криволинейных срезов заключено в интервале:

- для выпуклого контура – (79,0 ÷ 80,0),
- для вогнутого контура – (80,62 ÷ 81,58).

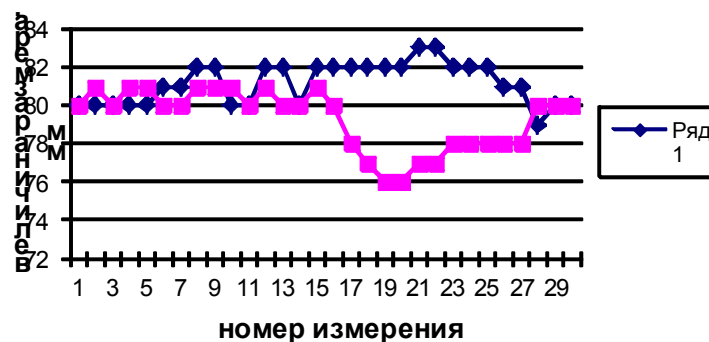


Рисунок 1 – Диаграмма распределения размера *a* верхнем уровне варьирования ряд 1 – распределение погрешности по первой модели, ряд 2 – по второй

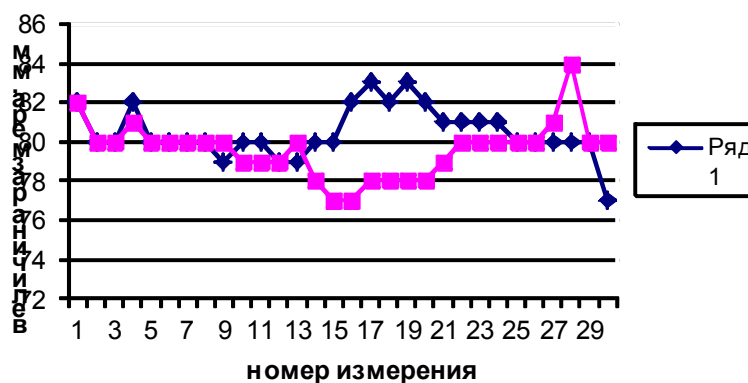


Рисунок 2 – Диаграмма распределения размера на нулевом уровне варьирования

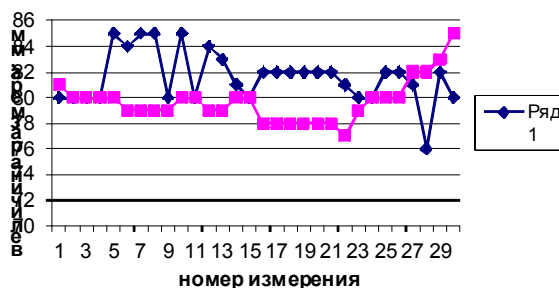


Рисунок 3 – Диаграмма распределения размера на нижнем уровне варьирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базюк, Г.П. Резание и режущий инструмент в швейном производстве /Г.П. Базюк. – М. : Легкая индустрия, 1980. – 187 с.
2. Моськина, Е.Л. Влияние настроечных декоративных элементов на изменение конфигурации конструктивных срезов / Е.Л. Моськина, Е.В. Прокопова // Известия ОрелГТУ. Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. – № 2. – С. 91-93.
3. Степанов, Ю.С. Прогрессивные технологии гидроструйного резания материалов [Текст] / Ю.С. Степанов, М.А. Бурнашов, К.А. Головин. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – 318 с.
4. Степанов, Ю.С. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технических тканей /Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков. - М.: Машиностроение, 2004. - 240 с.
5. Киричек, А.В. Технологическое обеспечение эффективности обработки эпиламированными быстро-режущими сверлами / А.В. Киричек, Е.А. Звягина // Известия Орел ГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2008. - №2-3/270(545). - С. 14-21.
6. Голубкова, В.Т. Подготовительно-раскройное производство швейных предприятий /В.Т. Голубкова, Р.Н. Филимоненкова [и др.]. Учебное пособие. – Мн.: Высш. школа, 2002. – 206 с.

Москина Елена Леонидовна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры ТИКШИ
Тел. (4862) 55 – 11- 20
E-mail: flptikshi@gmail.com

Проконова Елена Владимировна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры ТИКШИ
Тел. (4862) 55 – 11- 20
E-mail: flptikshi@gmail.com

Москин Артем Александрович

Студент ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Тел. (4862) 77-97-20
E-mail: topich94@mail.ru

Дюжиков Никита Владимирович

Студент ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Тел. (4862) 77-97- 20
E-mail: topich94@mail.ru

E.L. MOSKINA, E.V. PROKOPOVA, A.A. MOSKIN, N.V. DYGIKOV

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF CUTTING OF TEXTILE CLOTHS
WITH THE POLYURETHANE FIBRES**

*Physicomechanical properties of textile cloths make various impact on process of a flooring
and technology of cutting.*

Keywords: *a flooring, open, rigidity, flow-ability, resisance.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bazyuk, G.P. Rezanie i rezhushchiy instrument v shveynom proizvodstve /G.P. Bazyuk. – М. : Legkaya industriya, 1980. – 187 s.
2. Moskina, E. L. Vliyanie nastrochnykh dekorativnykh elementov na izmenenie konfiguracii konstruktivnykh srezov / E. L. Moskina, E. V. Prokopova // Izvestiya OrelGTU. Ser. Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2008. – № 2. – S. 91-93.
3. Stepanov, Yu.S. Progressivnye tehnologii gidrostruynogo rezaniya materialov [Tekst] / Yu.S. Stepanov, M.A. Burnashov, K.A. Golovin. – Tula: Izd-vo TulGU, 2009. – 318 s.
4. Stepanov, Yu.S. Sovremennye tehnologicheskie processy mehanicheskogo i gidrostruynogo raskroya tehnicheskikh tkaney Yu.S. Stepanov, G.V. Barsukov. - М.: Mashinostroenie, 2004. - 240 s.
5. Kirichek, A.V. Tehnologicheskoe obespechenie effektivnosti obrabotki epilamirovannymi bystro-rezhushchimi sverlami / A.V. Kirichek, E.A. Zvyagina // Izvestiya Orel GTU. Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - 2008. - №2-3/270(545). - S. 14-21.
6. Golubkova, V. T. Podgotovitelno-raskroynoe proizvodstvo shveynykh predpriyatiy / R.N. Filimonenkova [i dr.]. Uchebnoe posobie. – Mn.: Vyssh. shkola, 2002. – 206 s.

Moskina Elena Leonidovna

State University - ESPC
Cand. Sci. tech., associate professor of TIKShI
Tel. (4862) 55 – 11- 20
E-mail: flptikshi@gmail.com

Prokopova Elena Vladimirovna

State University - ESPC
Cand. Sci. tech., associate professor of TIKShI
Tel. (4862) 55 – 11- 20;
E-mail: flptikshi@gmail.com

Moskin Artyom Aleksandrovich

State University - ESPC
student
Tel. (4862) 77-97-20
E-mail: topich94@mail.ru

Dyuzhikov Nikita Vladimirovich

State University - ESPC
student
Tel. (4862) 77-97- 20;
E-mail: topich94@mail.ru

ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 338.012+378

Е.Ю. СТЕПАНОВА

ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КАДРОВ ДЛЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР ОБОРОННО- ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Показана роль оборонно-промышленного комплекса (ОПК) в экономике России, его связь с гражданским сектором. Указываются причины проблем ОПК, значимость подготовки и переподготовки кадров для развития ОПК. Предложены направления повышения качества подготовки кадров ОПК и меры по преодолению дефицита кадров.

Ключевые слова: оборонно-промышленный комплекс, образование, дефицит кадров, подготовка и переподготовка кадров, государственный заказ, интегрированные структуры, сетевое взаимодействие.

Оборонно-промышленный комплекс (ОПК) представляет собой особо важную, наиболее высокотехнологичную, передовую в научном и производственном плане часть экономики страны, которая является фундаментом ее национальной безопасности. Мировые события последних лет в различных точках планеты подтверждают необходимость его постоянного укрепления. ОПК представляет собой очень сложную систему в виде достаточно разветвленной сети географически распределенных по всей территории страны предприятий с разным уровнем научного, технического, технологического и экономического потенциалов.

В состав ОПК ныне входят 1353 организаций, в которых работает около 2 млн. человек. В последние годы в отрасли происходят заметные интеграционные процессы, создано 55 интегрированных структур, выпускающих 60% всей продукции [1].

ОПК всегда был локомотивом научно-технического прогресса. Здесь еще со времен СССР традиционно были сосредоточены лучшие научные силы, технологический и технический потенциал. Созданные в нем новые материалы, технологии и оборудование затем успешно применялись и применяются в гражданском секторе экономики.

Такое положение характерно для большинства развитых стран. Вспомним хотя бы создание Internet, GPS, самолетов-невидимок типа стелс в свое время в американском Исследовательском агентстве передовых оборонных проектов (DARPA), значение которых для развития как оборонно-промышленного комплекса, так многих гражданских отраслей экономики не только США, но и во всех странах мира трудно переоценить. Такие же примеры можно назвать и в России из области ядерных, авиационных и космических технологий, которые вышли из оборонки, но нашли широкое применение для мирных целей: атомная энергетика, радиомедицина, космическая связь, глонасс, телекоммуникации, биотехнологии, космический мониторинг и многое другое.

Один искусственный спутник Земли за один оборот вокруг планеты передает объем метеоданных, превышающий почти в 100 раз объем информации, поступающей от всех метеостанций земного шара (10 тысяч ед.) [2].

В советские времена на обороноспособность страны в той или иной степени работали практически все министерства и ведомства, только непосредственно на ОПК – 11 министерств. Более 75% НИОКР и ОТР в стране выполнялись в интересах ОПК. 25% ВВП шло на вооружение. В этой области работала элита специалистов страны, из которой впоследствии выросли те, которые создали научно-технический задел, которым пользуются уже 30 последних лет гражданские и оборонные сектора экономики. 83% ученых и технологов занимались военной тематикой. Результатом этого стало признание мирового уровня отечествен-

ной военной техники и вооружений оборонной промышленности, что подтверждается и ныне их экспортом во многие страны: Россия стала одним из крупнейших экспортеров вооружений, занимая с 2005 по 2013 годы второе место в мире, уступая только США [3].

Уровень развития ОПК определяет во многом эффективность развития различных отраслей экономики, в том числе машино- и приборостроения, энергетики, электроники, транспорта, связи, телекоммуникаций, медицины и др. Не забудем отметить, что 30% продукции ОПК предназначена для гражданского сектора экономики.

Однако, не смотря на значительные успехи и достижения, в ОПК накопилось за последние десятилетия много проблем, как и во многих отраслях машиностроения [4, 5]. Его не обошла "утечка мозгов" и «золотых рук». Этот неуправляемый и с большим трудом восполнимый отток наиболее квалифицированных кадров, обусловленный отсутствием или снижением госзаказа и разразившимся платежным кризисом, падением репутации и престижа инженерного труда, составил в ОПК в 90-х годах прошлого века от 1,5 до 2 млн. человек! [6], а общее количество занятых в военно-промышленном комплексе с начала девяностых годов до настоящего времени сократилось с 10 до 1,5 млн. человек. Произошел спад фундаментальных и прикладных исследований. Хроническое недофинансирование в течение последних 30 лет привело к тому, что отечественный ОПК по признанию руководства страны, пропустил несколько циклов модернизации. С одной стороны страна как бы сэкономила громадный объем финансовых средств, «срезала углы», а с другой – не улучшило качество технологического и человеческого капитала, выпускала неконкурентоспособную продукцию, воспроизводила технологическую отсталость, за что теперь стране приходится дорого расплачиваться. При этом износ основных фондов в отрасли оценивается в 60-80 %. Не решены еще также такие проблемы как коррупция при выполнении госзаказа, посредничество, низкая ответственность на всех уровнях, о чем говорят постоянные сообщения Счетной палаты, Следственного комитета и Генеральной Прокуратуры РФ.

Но самой острой и главной среди них на сегодняшний день является нехватка профессиональных кадров от рабочих, техников, инженеров до генеральных конструкторов и руководителей предприятий. Точнее сказать, кадровый вопрос для ОПК является основным. Этот вопрос среди других является самым сложно решаемым и требующим кропотливой работы, больших финансовых вложений и определенного интервала времени. Отрадно, что появилось понимание на всех уровнях власти: быстро и дешево эти проблемы не решить, а также, что богатство страны заключается, прежде всего, в мозгах, а не только в нефти и газе, т.к. новые разработки ВВТ и наукоемкие технологии в стране создают талантливые ученые, конструкторы, инженеры и рабочие. Имеющиеся же ресурсы старшего поколения инженерного корпуса постепенно иссякают.

Вот цифры, прозвучавшие на круглом столе Государственной Думы по проблемам подготовки кадров для ОПК [7]: дефицит рабочих составляет - 40%, инженеров-конструкторов - 22%, инженеров-технологов - 17%. 30% работников в ОПК старше 60 лет, средний возраст составляет 55-57 лет. Большой пробел кадров в возрасте 35-45 лет. Молодые рабочие и специалисты не идут или не задерживаются надолго в системе ОПК. Не вызывает особого оптимизма и структура специальностей выпускников вузов и ссузов, которые станут главным резервом кадров в ближайшем будущем. Так, например, 2011 году 119 тыс. выпускников ссузов получили специальности по экономике и управлению, только 300 - по энергетическому машиностроению, 14 тыс. - по электротехнике, 1,6 тыс. - по ракетно-космической технике; 380 тыс. выпускников вузов получили дипломы по экономике и управлению, 9 тыс. - по физико-математическим наукам, 12 тыс. - по естественным наукам, а по оружию и системам вооружения - всего 500 человек на всю страну.

Известный ученый и политик, В.Н. Никонов, председатель Комитета по образованию ГД РФ, считает, что действующая система подготовки кадров для ОПК сможет удовлетворить потребность в специалистах с высшим образованием менее чем на 30%, а в специалистах со средним образованием – только на 7%, при дефиците в 40%.

Учитывая демографический фактор и то, что ЕГЭ по физике выбирают менее 30% школьников, а по ряду регионов и того меньше, то очевиден факт ограниченного выбора абитуриентов на инженерные специальности вузов из-за низких конкурса и проходного балла. Но представьте, кто тогда будет создавать новое поколение оружия как климатическое, геофизическое, генетическое, волновое, психофизическое, гиперзвуковое, лучевое, беспилотные интеллектуальные наносистемы, нелетального воздействия и др., информацией о разработке которых в разных странах наполнен Интернет и СМИ, и которое требует фундаментальных и междисциплинарных знаний?

Найти или подготовить талантливого конструктора, технолога, механика всегда было нелегко. В СССР их искали, отбирали и растили многие годы. На таких «артистах», профессионалах своего дела часто держалось производство. Один человек мог определять судьбу предприятия, направления, отрасли: вспомним хотя бы наших великих соотечественников И.В. Курчатова, В.М. Келдыша, С.П. Королева. И этот ряд можно легко продолжить.

Но подготовить такого уровня специалистов не под силу ни одному учебному заведению. Нельзя и быстро решить эту проблему. По мнению И.Д. Спасского, генерального конструктора порядка 200 советских и российских подводных лодок и бывшего главы ЦКБ «Рубин», «чтобы подготовить настоящего серьезного проектировщика подводных кораблей необходимо 15-20 лет» [8]. С этим соглашается и один из руководителей ФГУП ЦНИИ «Гранит» (разработка, производство и поставка радиоэлектронного вооружения для ВМФ [9]), который считает, что для подготовки в своей отрасли ОПК специалиста среднего уровня, а именно руководителя нижнего, в лучшем случае, среднего уровня, ведущего инженера, необходимо 5-7 лет работы. А для подготовки заместителя главного конструктора или главного конструктора надо минимум 15 лет.

На Ижмаше к реальным «оружейным» проектам, по словам главного конструктора В. Злобина, раньше допускались конструкторы только со стажем порядка 20 лет [10]. Дефицит высококвалифицированных кадров заставляет искать пути подготовки смены за более короткие сроки. У российской оборонной промышленности, как и машиностроения в целом, нет такого временного лага.

Опыт генерального конструктора систем и средств радиоэлектронной борьбы ОАО «Концерн Радиоэлектронные технологии» Ю. Маевского говорит, что для подготовки нужного специалиста нужно до 10 лет [11].

Этого же мнения придерживался всю жизнь выдающийся конструктор стрелково-пушечных комплексов и высокоточного управляемого ракетного оружия А. Г. Шипунов, который говорил, что «...любая фирма сильна, прежде всего, кадрами, способными к творческой деятельности, а вовсе не площадями, не оборудованием и не количеством денег, которые в нее закачиваются». 70 комплексов автоматического стрелкового вооружения авиационного, морского и наземного базирования, созданные коллективом Конструкторского бюро приборостроения (г. Тула) под его руководством превосходят по эффективности и научно-техническому уровню зарубежные образцы, а некоторые просто не имеют и еще какое-то время не будут иметь аналогов в мире [12].

К сожалению, мощный кадровый потенциал создателей ВВТ, выросший в еще в союзном государстве, заметно поредел в силу естественных причин. В современных динамично развивающихся условиях, появлении новых угроз безопасности страны созданный еще в советское время институт генеральных конструкторов возложенных на него задач не выполняет. Этого мнения придерживается вице-премьер Правительства и председатель Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации Д.О. Рогозин. «Чтобы решить стоящие перед оборонной промышленностью задачи, необходимо создать креативный класс обороны в лице генеральных конструкторов как элиты инженерно-конструкторской мысли», – считает он [13]. При этом необходимо как расширение прав генеральных конструкторов, так и повышение уровня персональной ответственности. Генеральный конструктор должен иметь властные полномочия на целую отрасль, например, ракетно-космическую промышленность, атомную, авиационную и т.п.

Ряд проблем с подготовкой кадров для ОПК обусловлен как общей ситуацией в экономике страны вообще, так и не лучшей ситуацией в машиностроительном комплексе, в частности, а также в системе высшего профобразования. Не закончена работа по модернизации сети и внедрению адекватных ей финансовых и управленческих механизмов деятельности учебных заведений. По мнению А.А. Александрова, ректора МГТУ им. Н.Э. Баумана, «по своей сути она [подготовка кадров] является опережающей элитной подготовкой, целью которой является выпуск высококвалифицированных специалистов, имеющих наряду с глубокими фундаментальными знаниями практические умения, способных на самом высоком уровне осуществлять разработки в области новейшей техники, высоких технологий, наукоемких производств, использующих все последние достижения в сфере информационных технологий» [14, С. 155].

Но проблема не только в подготовке генеральных конструкторов для ОПК, а и в инженерно-технических кадрах вообще.

Проблемы и сложности в отборе кадров для ОПК, их подготовке и закреплению в интегрированных компаниях ОПК обусловлены многими факторами: хроническим недофинансированием предприятий в течение многих лет, отсутствием внятного госзаказа на подготовку кадров и НИОКР, низкой рентабельностью, отсутствием достойной заработной платы у работников ОПК, устаревшей материально-технической базой вузов и самих предприятий ОПК, низкой заработной платой ППС и стипендиями студентов, падением престижа инженерных профессий вообще, и оборонного профиля, в частности; невостребованностью потенциала вузовских ученых, разрушением научно-педагогических школ, отсутствием нормативно-правовой базы взаимодействия вузов и предприятий оборонной промышленности по закреплению молодых специалистов на предприятиях, по обеспечению их достойной заработной платой и гарантированными социальными гарантиями, по финансированию базовых кафедр и филиалов кафедр на предприятиях и ряд других. Возможные ограничения по территориальному перемещению при наличии доступа к гостайне также должны быть достойно скомпенсированы. Не вызывает сомнения, что подготовку кадров надо начинать с ранней профориентации еще со школьной скамьи и даже, может быть, в идеале, и раньше.

Необходимо создать систему подготовки и переподготовки кадров для ОПК - от рабочего до топ-менеджера оборонно-промышленных компаний и фирм, НИИ и научно-исследовательских и научно-технологических центров и промышленных предприятий разных форм собственности. Здесь важны все звенья цепи. Так при создании наукоемкой продукции необходимо поддерживать высокий уровень всех специалистов: от рабочего до ученого. Хорошо по этому поводу сказал российский ученый-физик, Виктор Ярба, работающий заместителем директора отделения Fermilab – знаменитой лаборатории имени Энрико Ферми (Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia, Illinois, USA), в которой проводят исследования в области физики высоких энергий: «Любая наука – пирамида. Нельзя создать пирамиду нужной устойчивости, лишь платя ученым столько, сколько платят в Фермилаб. Инженер здесь получает не меньше, чем ученый. Иногда больше. Квалифицированный рабочий должен получать, по меньшей мере, 50–70 % того, что получает ученый. Нужна вся структура. Нельзя выбрать нескольких ученых, начать им платить и думать, что без остальных обойдутся. Проблема не в одной зарплате... Проблема в устойчивости, последовательности, преемственности, то есть в ответственном отношении к образованию и науке. Законы должны помогать прогрессу, а не отодвигать его в сторону» [15].

Подготовка кадров должна вестись, по мнению многих специалистов, в условиях тесной интеграции образования, науки и наукоемкого производства. Эффективность подготовки кадров в таких интегрированных комплексах доказана многолетней практикой [16-18]. Кроме того, ожидается, что многие выпускники национальных исследовательских университетов, которые уже получили значительные финансовые вливания в развитие инфраструктуры, материально-технической базы и человеческого капитала, также вольются в наукоемкие производства ОПК.

Развитие кадрового потенциала ОПК требует системного подхода. Так проф. Б.А. Виноградов неоднократно подчеркивал в своих работах [19], что «требуется решение трех взаимосвязанных задач: формирование и переподготовка кадрового состава, способного провести модернизацию предприятий ОПК, подготовка научных и научно-педагогических кадров мирового уровня, готовящих кадры для ОПК; подготовка конкурентоспособных специалистов и научных кадров для модернизированных предприятий и организаций».

В этой области предлагаются различные пути решения проблем: от тесной интеграция вузов и оборонных предприятий, создание профильных кафедр в университетах, возглавляемых генеральными конструкторами ОПК, воссоздания военных кафедр, где будущий создатель военной техники мог бы уже на учебной скамье практически познакомиться с действующими образцами ВВТ, создания центров интеграции компетенций, образовательных кластеров, технологических центров, целевых кластеров и др. до создания федеральных университетов оборонных технологий, в которых «доводку» инженеров должны вести специалисты-практики ОПК [19-21]. Предлагаемые структуры могут быть как при университетах, создаваться на базе частно-государственного партнерства, на ассоциативной основе, а также сетевой основе.

В Калужской области, в Калужском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана внедряют хорошо зарекомендовавшую себя дуальную систему образования, для автомобильного кластера области готовят кадры в созданном Центре подготовки кадров для автопрома. В корпорации «Уралвагонзавод», крупнейшем комплексе, объединяющем промышленные предприятия и корпоративный университет, получен положительный опыт его работы, где одновременно с обучением инженеров ведется подготовка специалистов среднего звена. Корпоративные университеты созданы и успешно работают в крупнейших компаниях «Северсталь», «Русал», «Камаз», «Автоваз», «Группа ГАЗ», «Sollers» и др. [22].

Появились новые образовательные структуры на базе межвузовской интеграции и сетевого взаимодействия - Поволжский кластерный университет «Автомобилестроение», объединяющий Тольятинский ГУ, Казанский ГТУ им. А.Н. Туполева, Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева, Камскую государственную инженерно-экономическую академию, Ульяновский ГТУ, Ижевский ГТУ и Тольяттинскую академию управления [23].

Главным выводом из этих предложений и опыта различных регионов является то, что без теснейшего взаимодействия с реальным производством на этапе специальной подготовки обойтись невозможно. Без участия государства в этом вопросе не обойтись. Одной из самых перспективных форм взаимодействия, по нашему мнению, является сетевое. Несомненно, без государственно-частного партнерства в этой области также не обойтись. Требуется принятия целого комплекса нормативно-правовых актов, обеспечивающих реализацию планов развития ОПК страны.

Начало положено: работает «Президентская программа подготовки инженерных кадров на 2012-2014 гг.», почти готова государственная программа «Подготовка и переподготовка квалифицированных кадров для организаций оборонно-промышленного комплекса в 2014 - 2020 гг.», идет реализация Государственной программы вооружения на период 2011-2020 гг., общий объем которой составляет 23 трлн. рублей.

Большая турбулентность и бифуркации по периметру границ нашей страны требуют принятия и выполнения решений в полном объеме по развитию ОПК, в целом и кадрового вопроса, в частности. Нет сомнения, что эти проблемы будут решены, так как от этого зависит безопасность и суверенитет государства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Президента России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/transcripts/16328>.
2. Все о космосе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.allkosmos.ru/kosmicheskaya-era>.
3. Никонов: Система ОПК испытывает серьезный кадровый голод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.er-duma.ru/press/59044>.

4. Степанова, Е.Ю. Проблемы и тенденции в машиностроительном комплексе России и мировой финансовый кризис / Е.Ю. Степанова // Известия Орловского государственного технического университета. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2009. - № 2-3 274 (560). - С. 143-148.
5. Степанова, Е.Ю. Развитие машиностроения и новые возможности в условиях глобального экономического кризиса /Е.Ю. Степанова/Совершенствование существующих и создание новых технологий в машиностроении и авиастроении: Сб. тр. (1-3 июня 2009 г., г. Ростов-на Дону). - Ростов-на Дону: Изд-во ИОНЦ РАН, 2009. - С. 109 - 117.
6. Кривов, В.Д. Оборонно-промышленный комплекс — фундамент военной безопасности России / В.Д. Кривов //налитический вестник Совета Федерации ФС. Вопросы военной безопасности Российской Федерации. - № 19 (307). - 2006. – С. 27-43.
7. Портал «Рынок труда и рынок образовательных услуг. Регионы России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.duma.gov.ru/news/273/321581>.
8. Эволюция конструктора – эволюция подводного флота [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=1208>.
9. Кадровые проблемы промышленных предприятий ВПК. Основные направления их решений [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://stra.teg.ru/lenta/innovation/1446>.
10. Портал «Военные ведомости России» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://voennovosti.ru/2013/02/u-glavnogo-konstruktora-izhmasha-vladimira-zlobina-segodnya-yubilej-50-let>.
11. Сайт «Военное обозрение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://topwar.ru/30110-genkonstruktor-sistem-reb-tehnologii-inogda-tyanut-nas-nazad.html>.
12. Завещание Конструктора [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tula.mk.ru/article/2013/05/08/851904-zaveschaniye-konstruktora.html>.
13. Креативный класс поработает на оборонку [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rbcdaily.ru/economy/562949989201439>.
14. Военно-промышленная конференция «Актуальные вопросы развития оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации» 20 марта 2013 года: Сборник докладов. - М.: Военно-промышленная комиссия при Правительстве Российской Федерации, 2013. – 256 с.
15. Поиск. № 20 (1146). 20 мая 2011 г.
16. Голенков, В.А. Вуз как важнейший фактор инновационного развития территорий /В.А. Голенков, Е.Ю. Степанова, Л.И. Поляндова / Территории инновационного развития регионов на пути к инновационному обществу: Материалы научно-практической конференции 9-10 декабря 2008 г.: Тверь: Тверской ИнноЦентр, 2009. – С. 252 - 258.
17. Степанова, Е.Ю. Роль университетских комплексов в инновационном развитии регионов / Е.Ю. Степанова, Л.И. Поляндова // Управленческий учет. - М.: «Финпресс», 2009. - № 1. - С. 102 — 112.
18. Инновационные кадры России: инвестиции, инновации, инфраструктура, интеллектуальный капитал /В.Т. Смирнов, Г.В. Барсуков, С.И. Пахомов, Е.М. Родионова, Е.Ю. Степанова, В.В. Смирнов, Т.Н. Ямщикова /. Под общ. ред. Ю.С. Степанова. - М.: Машиностроение, 2009. – 356 с.
19. Виноградов, Б.А. Системный подход к развитию кадрового потенциала ОПК //Инновации. - № 9 (143). – 2010. – С. 45 – 51.
20. Григорьев С.Н. Подготовка кадров оборонно-промышленного комплекса России: проблемы и пути решения / С.Н. Виноградов, Ю.Я. Еленева // Высшее образование в России. - №6. – 2013. – С. 3-11.
21. Кадры для оборонной промышленности: проблемы подготовки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pressria.ru/pressclub/20131023/948587881.html>.
22. Готовить кадры для инновационного развития экономики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://trpkaluga.ru/news/news_detail.php?ID=7856.
23. Балыкина, Т. Ценный кадр/ Т. Балыкина //Автобизнес. - Июль-август (109-110) 2010. – С. 55-56.

Степанова Елена Юрьевна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»
Кандидат экономических наук, доцент
302020, Орел, Наугорское шоссе, 40
Тел. 42-11-05
E-mail: eco-nauka@ya.ru

E.YU. STEPANOVA

**PROBLEMS OF TRAINING ENGINEERING AND TECHNICAL
PERSONNEL OF THE INTEGRATED STRUCTURES
FOR THE DEFENSE-INDUSTRIAL SECTOR**

To show the role of defense-industrial sector (DIC) in the economics of Russia, its connection with the civil sector. The reasons for the problems of DIC importance of training and retraining for the development of DIC. Suggested directions of increasing the quality of training DIC measures to overcome the personnel shortage.

Keywords: *defense-industrial sector, education, the shortage of personnel, training and re-training of personnel, state order, integrated structures, network interaction.*

BIBLIOGRAPHY

1. Oficial'nyj sajt Prezidenta Rossii [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.kremlin.ru/transcripts/16328>.
2. Vse o kosmose [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.allkosmos.ru/kosmicheskaya-era>.
3. Nikonov: Sistema OPK ispytyvaet ser'eznyj kadrovyy golod [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.er-duma.ru/press/59044>.
4. Stepanova, E.Ju. Problemy i tendencii v mashinostroitel'nom komplekse Rossii i mirovoj finansovoy krizis /E.Ju. Stepanova// Izvestija Orlovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - 2009. - № 2-3 274 (560). - S. 143-148.
5. Stepanova, E.Ju. Razvitie mashinostroenija i novye vozmozhnosti v uslovijah global'nogo jekonomicheskogo krizisa /E.Ju. Stepanova/Sovershenstvovanie sushhestvujushhih i sozdanie novyh tehnologij v mashinostroenii i aviaostroenii: Sb. tr. (1-3 ijunya 2009 g., g. Rostov-na Donu). - Rostov-na Donu: Izd-vo JuNC RAN, 2009. - S. 109 - 117.
6. Krivov, V.D. Oboronno-promyshlennyj kompleks — fundament voennoj bezopasnosti Rossii / V.D. Krivov // naliticheskij vestnik Soveta Federacii FS. Voprosy voennoj bezopasnosti Rossijskoj Federacii. - № 19 (307). - 2006. – S. 27-43.
7. Portal «Rynok truda i rynek obrazovatel'nyh uslug. Regiony Rossii [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.duma.gov.ru/news /273/321581>.
8. Jevoľucija konstruktora – jevoľucija podvodnogo flota [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=1208>.
9. Kadrovye problemy promyshlennyh predpriyatij VPK. Osnovnye napravlenija ih reshenij [Jelektronnyj resurs]. - Rezhim dostupa: <http://stra.teg.ru/lenta/innovation/1446>.
10. Portal «Voennye vedomosti Rossii» [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://voennovosti.ru/2013/02/u-glavnogo-konstruktora-izhmasha-vladimira-zlobina-segodnya-yubilej-50-let>.
11. Sajt «Voennoe obozrenie [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://topwar.ru/30110-genkonstruktor-sistem-reb-tehnologii-inogda-tyanut-nas-nazad.html>.
12. Zavesshhanie Konstruktora [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://tula.mk.ru/article/2013/05/08/851904-zaveschanie-konstruktora.html>.
13. Kreativnyj klass porabotaet na oboronku [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://rbcdaily.ru/economy/562949989201439>.
14. Voенно-promyshlennaja konferencija «Aktual'nye voprosy razvitija oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossijskoj Federacii» 20 marta 2013 goda: Sbornik dokladov. - M.: Voенно-promyshlennaja komissija pri Pravitel'stve Rossijskoj Federacii, 2013. – 256 s.
15. Poisk. № 20 (1146). 20 maja 2011 g.
16. Golenkov, V.A. Vuz kak vazhnejshij faktor innovacionnogo razvitija territorij /V.A. Golenkov, E.Ju. Stepanova, L.I. Polandova / Territorii innovacionnogo razvitija regionov na puti k innovacionnomu obshhestvu: Materialy nauchno-praktičeskoj konferencii 9-10 dekabnja 2008 g.: Tver': Tverskoj InnoCentr, 2009. – S. 252 - 258.
17. Stepanova, E.Ju. Rol' universitetskijh kompleksov v innovacionnom razvitii regionov / E.Ju. Stepanova, L.I. Polandova // Upravlenčeskij učet. - M.: «Finpress», 2009. - № 1. - S. 102 — 112.
18. Innovacionnye kadry Rossii: investicii, innovacii, infrastruktura, intellektual'nyj kapital /V.T. Smirnov, G.V. Barsukov, S.I. Pahomov, E.M. Rodionova, E.Ju. Stepanova, V.V. Smirnov, T.N. Jamshhikova /. Pod obshh. red. Ju.S. Stepanova. - M.: Mashinostroenie, 2009. – 356 s.
19. Vinogradov, B.A. Sistemnyj podhod k razvitiju kadrovogo potenciala OPK //Innovacii. - № 9 (143). – 2010. – S. 45 – 51.
20. Grigor'ev S.N. Podgotovka kadrov oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii: problemy i puti reshenija / S.N. Vinogradov, Ju.Ja. Eleneva // Vysshee obrazovanie v Rossii. - №6. – 2013. – S. 3-11.
21. Kadry dlja oboronnoj promyshlennosti: problemy podgotovki [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://pressria.ru/pressclub/20131023/948587881.html>.
22. Gotovit' kadry dlja innovacionnogo razvitija jekonomiki [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://tppkaluga.ru/news/news_detail.php?ID=7856.
23. Balykina, T. Cennyj kadr/ T. Balykina //Avtobizness. - Ijul'-avgust (109-110) 2010. – S. 55-56.

Stepanova Elena Yurievna

State University-ESPC

Candidate of Economic Scieces, Associate Professor

302020, Orel, Naugorskoe highway, 40

Tel. 42-11-05

E-mail: eco-nauka@ya.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 577.31: 615.849

Е.В. ШАЛОБАЕВ, А.В. ДУНАЕВ, О.Д. КОЗЫРЕВА

СКАНИРУЮЩАЯ ЛАЗЕРОТЕРАПИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ И МЕХАТРОННЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКИХ УСТАНОВОК

В статье рассмотрен метод сканирующей лазерной низкоинтенсивной терапии, как один из методов современного физиотерапевтического лечения. Приведены особенности низкоинтенсивного лазерного излучения и на их основании описан принцип работы биологической обратной связи (БОС), также приведены примеры. БОС позволяют разрабатывать методы, которые дают возможность оперативного контроля состояния пациента, например диагностики кровотока до, во время и после сеанса лазерной терапии. Такие методы обеспечивают возможность адаптивной индивидуальной коррекции и оптимизации параметров воздействия в ходе сеанса и курса лечения. Указаны мехатронные аспекты медицинских установок на основе сканирующей лазерной терапии, что позволяет применить мехатронный подход при их проектировании, позволяющий повысить их качество.

Ключевые слова: низкоинтенсивная лазерная терапия, биологическая обратная связь, сканирующая лазерная терапия, медицинские мехатронные комплексы.

Введение

В последнее время в различных областях медицины все больше применяется лазеротерапия как лечение [1]. Лазеротерапия может быть использована как основной метод лечения, или в комбинации с другими методами, повышая тем самым их эффективность. Низкоинтенсивное лазерное излучение обладает такими свойствами, как монохроматичность, когерентность, высокая спектральная плотность мощности излучения, возможность простой фокусировки и т.д. Основными последствиями низкоинтенсивной лазерной терапии, которые определяют показания к лазеротерапии, являются: общий биостимулирующий эффект, повышение тонуса; усиление биоэнергетических процессов, нейтрализация катаболических сдвигов; нормализация иммунной, нервной и эндокринной систем; стимуляция репаративных процессов, заживления хронических язв. Эти и другие особенности низкоинтенсивного лазерного излучения делают лечебный прием универсальным и перспективным для большинства медицинских специальностей. Благодаря совершенствованию за последние годы аппаратуры для проведения лазеротерапии появилось большое количество приборов, обеспечивающих различные варианты трансмиссии лазерного излучения. Один из вариантов – транскутанный, различают контактное и бесконтактное облучение очага поражения.

Метод сканирующей лазеротерапии

В данной статье рассмотрен метод сканирующей лазеротерапии, который заключается в бесконтактном воздействии сфокусированным лазерным лучом диаметром 3 мм и интенсивностью 20 мВт без потери мощности излучения на поверхность кожи с различной частотой сканирования [2, 3]. Облучение сфокусированным лучом дает возможность равномерно воздействовать дозированным излучением на каждую точку пораженной поверхности, но для этого луч должен перемещаться по всей поверхности, иными словами сканировать поверхность. Используя режим сканирования, можно обработать зону любой конфигурации. Воздействие на большие поверхности сфокусированным лучом обеспечивает передачу энергии излучения тканям за достаточно короткое время, так как за счет перемещения луча создаются условия для последовательного периодического воздействия и равномерного распределения энергии лазерного излучения в зоне обрабатываемой поверхности, что позволяет получить лечебный эффект.

При непрерывном излучении лазера создается импульсный режим облучения за счет пространственного перемещения луча для каждой отдельной точки поверхности. Это обеспе-

печивает благоприятный режим лечения. Благодаря сканирующему устройству (рефлектору) можно подобрать соответствующую фигуру сканирования в соответствии с площадью и состоянием поверхности, подлежащей лечению, то есть проводить лечение пациентов по индивидуальной программе. Немаловажно также то, что использование метода сканирующей лазеротерапии позволяет уменьшить уровень облучения медицинского персонала, так как после начальной настройки управление стимулятором осуществляется автоматически [4]. Было доказано, что данный метод лечения на уровне тканей и органов проявляется в стимуляции изменений рецепторной чувствительности, укорочении фазы воспаления, увеличении потребления тканями кислорода, улучшении микроциркуляции крови, активации транспорта веществ через сосудистые стенки.

Результирующий фотобиологический эффект действия лазерного излучения на организм в целом выражается в противовоспалительной, регенеративной, иммунокорректирующей и бактериостатической реакциях, в улучшении региональной микроциркуляции в тканях и органах, нормализации липидного обмена [5].

Достоинством лазерной медицинской аппаратуры является возможность оперативно изменить параметров лазерного излучения для получения желаемого результата его воздействия, что достигается с помощью цепей биологической обратной связи [6]. С их помощью осуществляется оптимизация лазерного воздействия на биоткань, при котором физиотерапевтическое воздействие на ткани и органы является наиболее эффективным и атравматичным [2, 7, 8].

В последнее десятилетие в связи с интенсивным развитием оптических диагностических методов, таких как фотоплетизмография (ФПГ), пульсоксиметрия (SaO₂), оптическая тканевая оксиметрия (ОТО), лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ), оптическая когерентная томография (ОКТ) и др., всё более актуальным становится вопрос о возможности их применения в качестве методов контроля эффективности лазеротерапии в режиме реального времени [9]. Связано это прежде всего с тем, что современные приборы оптической неинвазивной диагностики (ОНД) достаточно достоверно и легко могут регистрировать изменения в микроциркуляции и оксигенации крови, что в свою очередь является одним из ключевых моментов при оценке лечебного эффекта лазерного излучения, так как в медицинской литературе вопрос о стимуляции периферического кровообращения в тканях при лазеротерапии практически уже не вызывает споров [10, 11].

Одним из наиболее чувствительных методов регистрации динамики процессов микроциркуляции крови (МЦК) в биотканях по технологии ОНД является сегодня метод ЛДФ. Он позволяет определять среднюю перфузию тканей кровью, измеряемую в относительных перфузионных единицах (пф. ед.), на уровне микроциркуляторного русла биоткани, а также частотные ритмы процессов микрогемодинамики. Так, в ряде тестовых экспериментов для регистрации параметров МЦК использовался многофункциональный лазерный неинвазивный диагностический комплекс «ЛАКК-М» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва), обеспечивающий одновременные измерения как перфузии ткани кровью, так и сатурации оксигемоглобина в смешанной крови микроциркуляторного русла (StO₂) и объёма фракции гемоглобина в зондируемой области по методу ОТО [12, 13]. На рисунке 1 представлены фрагменты зарегистрированных типичных ЛДФ-грамм до и после процедуры лазерной терапии на условно здоровом добровольце при облучении в области внутренней стороны предплечья со стороны локтевого сгиба. Таким образом, метод ЛДФ, как и другие технологии ОНД, являются перспективными для использования их в качестве биологической обратной связи по критерию отклика в системе микроциркуляции крови при низкоинтенсивной лазерной терапии.

Исследования механизмов взаимодействия низкоинтенсивного лазерного излучения с внутренней средой организма человека показали возможность наблюдения за изменением параметров крови, например, степенью насыщения крови кислородом, то есть степенью оксигенации крови. Измерение степени оксигенации крови необходимо при оценке работы сердечно-сосудистой системы и легких пациента. Измерение оксигенации можно проводить во время лазеротерапии при помощи оксиметров. Оксиметры могут работать в двух режимах: режим поглощения и режим отражения излучения. В случае отражения измеряется сигнал обратного рассеяния крови.

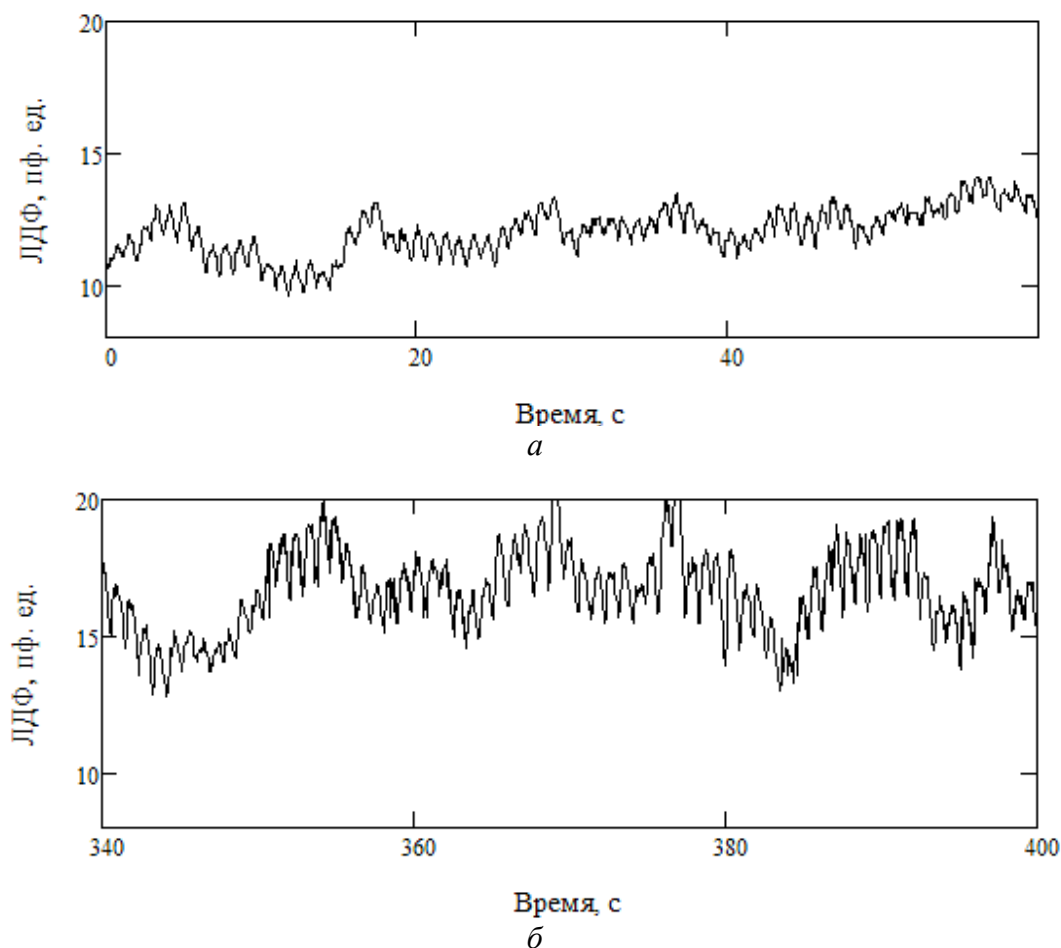


Рисунок 1 – Примеры фрагментов типичных ЛДФ-грамм до (а) и после (б) процедуры лазеротерапии
 импульсная мощность – 7 Вт, частота – 30 кГц, длительность импульса – 200 нс,
 площадь облучения – 2 см², энергетическая экспозиция – 6,3 Дж/см²

Доказано, что в области длин волн 650-750 нм возможно проводить достаточно точные измерения степени оксигенации крови при помощи измерения интенсивности диффузно рассеянного излучения [14].

Также на основе исследования механизмов взаимодействия лазерного излучения с тканями человека при изучении схем поглощения, отражения и преломления можно сделать вывод о возможности построения систем биологических обратных связей на основе учета пульса, артериального давления и других параметров [15, 16]. В режиме биоуправления по сигналам с датчиков пульса и дыхания пациента интенсивность лазерного воздействия автоматически синхронизована с биоритмами кровенаполнения ткани, открытием капилляров над ансамблем клеток с повышенной в данный момент чувствительностью и энергообеспечением ответных реакций. Благодаря такому режиму резко расширяется диапазон положительных реакций клеток, увеличивается их чувствительность, уменьшается вероятность передозировки. Такой режим лазерной терапии гарантирует лечебный эффект для всех пациентов при условии его грамотной технической реализации [17].

В настоящее время разрабатывается методика автоматизированной коррекции гемодинамических расстройств, которая заключается в формировании управляющего сигнала (отвечающего за мощность и позиционирование лазера) для лазерной установки на основе разницы между эталонной реограммой и реограммой пациента (участка тела) в режиме реального времени [18]. Предлагаемая методика должна позволить более эффективно использовать методы лазерной терапии при лечении нарушений кровотока. Методика рассчитана на основе численного эксперимента с помощью методов математического моделирования. В качестве эталонного сигнала использовалась типовая реограмма, соответствующая пульсу с

частотой 75 ударов в минуту. Метод дает возможность оперативного контроля состояния пациента и диагностики кровотока до, во время и после сеанса лазерной терапии. Разработка обеспечивает возможность адаптивной индивидуальной коррекции и оптимизации параметров воздействия в ходе сеанса и курса лечения.

Мехатронные аспекты проектирования медицинских установок на основе сканирующей лазеротерапии

В соответствии с действующим в России определением мехатроники, это область науки и техники, основанная на системном объединении узлов точной механики, датчиков состояния внешней среды и самого объекта, источников энергии, исполнительных механизмов, усилителей, вычислительных устройств (ЭВМ и микропроцессоры).

Мехатронная система – единый комплекс электромеханических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенный общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта.

Участие в разработке рассматриваемой в публикации медицинской установки позволило авторам наполнить содержанием предлагаемый в работе [19] термин «мехатронные комплексы».

С точки зрения идеологии мехатроники рассматриваемая в работе медицинская установка представляет собой распределенную систему, не имеющую единого корпуса (рис. 2). Ранее такие системы, не только в медицине, но и в других отраслях рассматривались как системы лишь с элементами мехатроники, как например, в работе [20]. Даже был введен в научный оборот термин «мехатронизированный объект» [21], а позднее – термин «объект с элементами мехатроники» [22].

Однако в данном рассматриваемом случае имеет место именно «мехатронный комплекс», определяемый как совокупность элементов, связанных конкретной общей целью.

В соответствии с развитием мехатроники как науки, в работах (например, [23, 24]) показано, что такие установки относятся к мехатронным комплексам по определению. Указание на подобный вывод очень важно потому, что при проектировании таких установок необходимо вести разработку всех составляющих ее частей параллельно, то есть, иначе говоря, используя мехатронный подход при проектировании, чтобы получить максимальный качественный эффект.

Здесь необходимо сделать ряд замечаний.

Первое: мехатронный и системный подходы не являются синонимами. Мехатронный подход – частный случай системного подхода, поскольку в определении мехатроники есть такая обязательная характеристика как синергетическое единство.

Второе необходимое замечание: в мехатронных комплексах могут использоваться мехатронные модули, то есть унифицированные узлы. Именно они представляют собой синергетически нерасторжимые без потери качества элементы. Иначе говоря, они неремонтопригодные. Комплексы же отличаются от модулей их составляющих, тем, что модули могут быть заменены, то есть налицо ремонтпригодность. Именно в этом принципиальное различие мехатронных систем разных уровней сложности, которыми и являются комплекс и модуль.

Указанный в публикации мехатронный подход при проектировании рассматриваемых медицинских установок должен будет учитывать именно этот аспект.

И дело здесь не просто в применении тех или иных терминов, а в совершенно разных подходах при проектировании, именно с этой целью и написана данная статья.

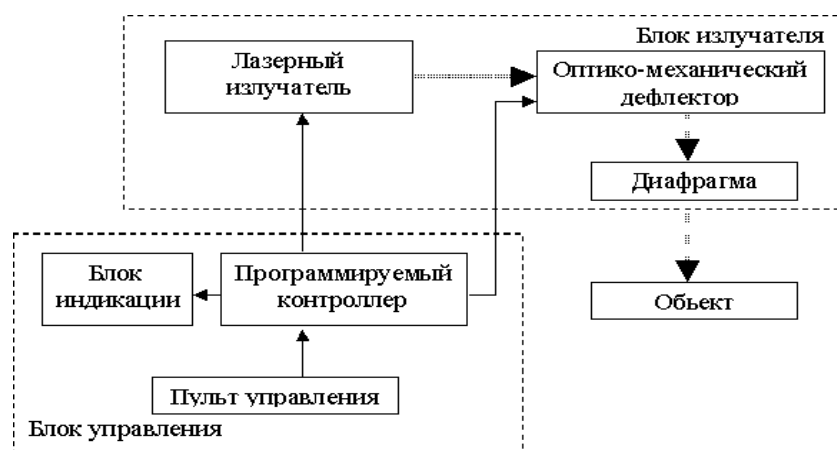


Рисунок 2 – Структурная схема лазерных сканирующих стимуляторов

Заключение

Подчеркнутые в работе мехатронные аспекты медицинских лазерных установок, использующих биологические обратные связи, требуют применения мехатронного подхода при проектировании.

Указанный подход, как уже указывалось выше, позволяет вести параллельное проектирование, которое позволяет повысить качество получаемой продукции с учетом особенности применения мехатронного подхода в случае комплекса. Таким образом, новое поколение программно-аппаратных лечебно-диагностических устройств, обладающее качественно новым свойствами и заявленное в работе [25], будет реализовано на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев, А.В. Лазерные терапевтические устройства: учеб. пособие / А.В. Дунаев, А.Р. Евстигнеев, Е.В. Шалобаев / под ред. К.В. Подмастерьева. – Орел-Калуга-СПб.: ОрелГТУ. – 2005. – 173 с.
2. Сканирующие лазерные датчики в системе диагностики и лечения заболеваний // В.Т. Ефименко, Е.В. Шалобаев, А.В. Ефименко, Г.Н. Юркова / Датчики и системы. – 2001. – № 11. – С. 47-49.
3. Лазерные стимуляторы / Е.В. Шалобаев, Г.Н. Юркова, В.Т. Ефименко, А.В. Ефименко // Датчики и системы. – 2001. – № 8. – С. 53-54.
4. Шалобаев, Е.В. Проблемы лазерной терапии: сканирующая лазеротерапия и сканирующие лазерные стимуляторы / Е.В. Шалобаев, А.В. Дунаев, О.Д. Козырева // Сб. тр. II Всерос. конгресса молодых ученых. – СПб.: НИУ ИТМО. – 2013. – С. 66-67.
5. Беликов, А.В. Лазерные биомедицинские технологии (часть 1) / А.В. Беликов, А.В. Скрипник. – СПб.: СПбГУ ИТМО. – 2008. – 97 с.
6. Управление в биотехнической системе / Е.В. Шалобаев, Г.Н. Юркова, В.Т. Ефименко и [др.] // Матер. III междунар. конф.: Управление в технических системах 13-14 ноября 2000 г. – Ковров: КГТА. – 2000. – С. 89-91.
7. Лазеротерапия в комплексном лечении сосудистой патологии нижних конечностей / Н.В. Леонтьева, В.П. Золотницкая, Я.В. Дмитриева, А.В. Ефименко // Медицинский академический журнал. – 2001. – № 1. – С. 39-40.
8. Леонтьева, Н.В. Рекомендации для медицинского персонала по практическому применению стимулятора лазерного сканирующего физиотерапевтического СЛСФ-01.20К / Н.В. Леонтьева / под ред. Н.Н. Петрищева и В.Т. Ефименко. – СПб.: ГМУ-НПО СКАЛА. – 1999. – 36 с.
9. Дунаев, А.В. К вопросу о возможности использования методов неинвазивной спектрофотометрии для контроля эффективности низкоинтенсивной лазерной терапии / А.В. Дунаев, Д.А. Рогаткин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 3/275 (561). – С. 110-115.
10. Рогаткин, Д.А. Низкоинтенсивная лазерная терапия. Взгляд физика на механизмы действия и опыт применения / Д.А. Рогаткин, Д.А. Черный // Взаимодействие излучения с веществом. – Материалы 2-й Байкальской школы по фундаментальной физике. – Иркутск: ИГУ. – 1999. – С. 366-378.
11. Дунаев, А.В. Физико-технические основы низкоинтенсивной лазерной терапии / А.В. Дунаев. – LAP. – 2012. – 296 с.
12. Динамика изменений параметров микроциркуляции крови и температуры биоткани при низкоинтенсивной лазерной терапии / А.В. Дунаев, Е.А. Жеребцов, Д.А. Рогаткин, К.С. Литвинова, М.И. Щербаков // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии. – Владимир: ВлГУ. – 2010. – С. 67-70.
13. Rogatkin, D.A. Stimulation of Blood Microcirculation at Low Level Laser Therapy: Monitoring Tools and Preliminary Data / D.A. Rogatkin, A.V. Dunaev // Journal of Medical Research and Development. – 2014. – Vol. 3, Iss. 1. – P. 100-106.

14. Козырева, О.Д. Исследование влияния степени оксигенации крови на сигнал обратного рассеяния излучения при помощи численного моделирования / О.Д. Козырева, А.Е. Пушкарева // Сб. тез. докл. конгресса молодых ученых. – СПб.: НИУ ИТМО. – 2014. – № 3.
15. Проблемы создания биологических обратных связей и их применение в сканирующих лазерных медицинских установках / Е.В. Шалобаев, Г.Н. Юркова, Ю.С. Монахов, В.Т. Ефименко, А.В. Ефименко, С.Ф. Корндорф, А.В. Дунаев // Известия ОрелГТУ. Сер. «Машиностроение. Приборостроение». – 2003. – № 4. – С. 94-97.
16. Применение биологических обратных связей и средств томографии в лазерных сканирующих физиотерапевтических установках / Е.В. Шалобаев, Н.В. Леонтьева, Ю.С. Монахов, А.В. Ефименко, К.В. Подмас-терьев, А.В. Дунаев // Технологии живых систем. – 2009. – № 4. – С. 66-72.
17. Загускин С.Л., Загускина С.С. Критерии оптимальности параметров лазерной терапии // Материалы Международной конференции «Лазерные и информационные технологии в медицине XXI века», II часть. – СПб.: МГУ им. И.П.Павлова. – 2001. – С. 349-350.
18. Модель динамического управления лазерным лучом и кровотоком на основе биологической обратной связи / В.Н. Баранов, П.В. Пикинеров, М.С. Бочков, А.С. Качалин // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 1. – [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_22_Baranov.pdf 2226.pdf. Дата обращения 15.03.2014.
19. Шалобаев, Е.В. Теоретические и практические проблемы развития мехатроники / Е.В. Шалобаев // Сб. «Современные технологии» / под. ред. С.А. Козлова. – СПб.: ГУИТМО. – 2001. – С. 46-66.
20. Шалобаев, Е.В. К вопросу об определении мехатроники и иерархия мехатронных объектов / Е.В. Шалобаев // Датчики и системы. – 2001. – № 7. – С. 64-67.
21. Shalobaev, E.V. Mechatronics: Today Problems and Development trends of Terminology / E.V. Shalobaev // Proceeding 23th Working Meeting of the IFToMM Permanent Commission for Standardization of Terminology on MMS. – Minsk-Gomel. – Belarus. – June 21 – June 26. – 2010. – P. 111-118.
22. Петров, С.Ю., Шалобаев Е.В. Универсальные регистрирующие и показывающие приборы как элемент иерархии мехатронных объектов / С.Ю. Петров, Е.В. Шалобаев // Мехатроника. – 2001. – № 5. – С. 29-34.
23. Шалобаев, Е.В. Терминологические аспекты современной мехатроники / Е.В. Шалобаев, Р.-Т. Толочка // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2013. – № 5. – С. 122-133.
24. Шалобаев, Е.В. Современное состояние и перспективы развития основных понятий в области мехатроники / Е.В. Шалобаев, Р.-Т. Толочка // Научно-технический вестник информационных технологий механики и оптики. – 2014. – № 1. – С. 156-165.
25. Загускин, С.Л. Новое поколение программно-аппаратных лечебно-диагностических устройств / С.Л. Загускин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 8. – С. 69-75.

Шалобаев Евгений Васильевич

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург
Кандидат технических наук, профессор
Тел.: дом. (812) 592-02.94, моб. +7-921-988-00-86
E-mail: shalobaev47@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение метрология и сертификация», ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия»
Тел.: (4862) 41-98-76, +7-919-261-99-06
E-mail: dunaev@bmcencenter.ru

Козырева Ольга Дмитриевна

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург
Студент
Тел.: +7 921 989 50 85
E-mail: kozyreva.o@list.ru

E.V. SHALOBAEV, A.V. DUNAEV, O.D. KOZYREVA

SCAN LASER THERAPY WITH THE USE OF BIOLOGICAL FEEDBACKS AND MECHATRONIC ASPECTS DESIGN OF MEDICAL DEVICES

The article describes the method of scanning laser therapy as one of the modern methods of treatment. The peculiarities of low-intensity laser radiation, and their basis the principle of operation of the biological feedback, as examples. Biological feedback loops make it possible to develop methods that allow you to control the condition of the patient, such as diagnosis of blood flow before, during and after your session of laser therapy. Such methods enable adaptive individual correction and optimization of pressure during the session and the course of treatment. Are mechatronic aspects of medical facilities based on scanning laser therapy, that allows to apply a mechatronic approach at designing, allowing to raise their quality.

Keywords: *Low Level Laser Therapy, biofeedback, scanning laser therapy, medical and mechatronic systems*

BIBLIOGRAPHY

1. Dunaev, A.V. Lazernye terapevticheskie ustrojstva: ucheb. posobie / A.V. Dunaev, A.R. Evstigneev, E.V. Shalobaev / pod red. K.V. Podmaster'eva. – Orel-Kaluga-SPb.: OrelGTU. – 2005. – 173 s.
2. Skanirujushhie lazernye datchiki v sisteme diagnostiki i lechenija zabolevanij // V.T. Efimenko, E.V. Shalobaev, A.V. Efimenko, G.N. Jurkova / Datchiki i sistemy. – 2001. – № 11. – С. 47-49.
3. Lazernye stimulatory / E.V. Shalobaev, G.N. Jurkova, V.T. Efimenko, A.V. Efimenko // Datchiki i sistemy. – 2001. – № 8. – С. 53-54.
4. Shalobaev, E.V. Problemy lazernoj terapii: skanirujushhaja lazeroterapija i skanirujushhie lazernye stimulatory / E.V. Shalobaev, A.V. Dunaev, O.D. Kozyreva // Sb. tr. II Vseros. kongressa molodyh uchenyh. – SPb. : NIU ITMO. – 2013. – S. 66-67.
5. Belikov, A.V. Lazernye biomedicinskie tehnologii (chast' 1) / A.V. Belikov, A.V. Skripnik. – SPb.: SPbGU ITMO. – 2008. – 97 s.
6. Upravlenie v biotekhnicheskoy sisteme / E.V. Shalobaev, G.N. Jurkova, V.T. Efimenko i [dr.] // Mater. III mezhdunar. konf.: Upravlenie v tehniceskix sistemah 13-14 nojabrja 2000 g. – Kovrov: KGTA. – 2000. – S. 89-91.
7. Lazeroterapija v kompleksnom lechenii sosudistoj patologii nizhnih konechnostej / N.V. Leont'eva, V.P. Zolotnickaja, Ja.V. Dmitrieva, A.V. Efimenko // Medicinskij akademicheskij zhurnal. – 2001. – № 1. – S. 39-40.
8. Leont'eva, N.V. Rekomendacii dlja medicinskogo personala po prakticheskomu primeneniju stimulyatora lazernogo skanirujushhego fizioterapevticheskogo SLSF-01.20K / N.V. Leont'eva / pod red. N.N. Petri-shheva i V.T. Efimenko. – SPb.: GMU-NPO SKALA. – 1999. – 36 s.
9. Dunaev, A.V. K voprosu o vozmozhnosti ispol'zovanija metodov neinvazivnoj spektrofotometrii dlja kontrolja jeffektivnosti nizkointensivnoj lazernoj terapii / A.V. Dunaev, D.A. Rogatkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2009. – № 3/275 (561). – S. 110-115.
10. Rogatkin, D.A. Nizkointensivnaja lazernaja terapija. Vzgljad fizika na mehanizmy dejstvija i opyt primeneniya / D.A. Rogatkin, D.A. Chernyj // Vzaimodejstvie izlucheniya s veshhestvom. – Materialy 2-j Bajkal'-skoj shkoly po fundamental'noj fizike. – Irkutsk: IGU. – 1999. – S. 366-378.
11. Dunaev, A.V. Fiziko-tehnicheskie osnovy nizkointensivnoj lazernoj terapii / A.V. Dunaev. – LAP. – 2012. – 296 c.
12. Dinamika izmenenij parametrov mikrocirkuljacii krovi i temperatury biotkani pri nizkointensivnoj lazernoj terapii / A.V. Dunaev, E.A. Zherebcov, D.A. Rogatkin, K.S. Litvinova, M.I. Shherbakov // Fi-zika i radiojel-ektronika v medicine i jekologii. – Vladimir: VIGU. – 2010. – S. 67-70.
13. Rogatkin, D.A. Stimulation of Blood Microcirculation at Low Level Laser Therapy: Monitoring Tools and Preliminary Data / D.A. Rogatkin, A.V. Dunaev // Journal of Medical Research and Development. – 2014. – Vol. 3, Iss. 1. – R. 100-106.
14. Kozyreva, O.D. Issledovanie vlijaniya stepeni oksigenacii krovi na signal obratnogo rassejanija izlucheniya pri pomoshhi chislenного modelirovanija / O.D. Kozyreva, A.E. Pushkareva // Sb. tez. dokl. kongressa molodyh uchenyh. – SPb.: NIU ITMO. – 2014. – № 3.
15. Problemy sozdaniya biologicheskix obratnyh svjazej i ih primenenie v skanirujushhix lazernyx medicinskix ustanovkah / E.V. Shalobaev, G.N. Jurkova, Ju.S. Monahov, V.T. Efimenko, A.V. Efimenko, S.F. Korndorf, A.V. Dunaev // Izvestija OrelGTU. Ser. «Mashinostroenie. Priborostroenie». – 2003. – № 4. – S. 94- 97.
16. Primenenie biologicheskix obratnyh svjazej i sredstv tomografii v lazernyx skanirujushhix fizioterapevticheskix ustanovkah / E.V. Shalobaev, N.V. Leont'eva, Ju.S. Monahov, A.V. Efimenko, K.V. Podmas-ter'ev, A.V. Dunaev // Tehnologii zhivyh sistem. – 2009. – № 4. – S. 66-72.
17. Zaguskin S.L., Zaguskina S.S. Kriterii optimal'nosti parametrov lazernoj terapii // Materialy Mezhdunarodnoj konferencii «Lazernye i informacionnye tehnologii v medicine XXI veka», II chast'. – SPb.: MGU im. I.P.Pavlova. – 2001. – S. 349-350.
18. Model' dinamicheskogo upravlenija lazernym luchom i krovotokom na osnove biologicheskoy obratnoj svjazi / V.N. Baranov, P.V. Pikinerov, M.S. Bochkov, A.S. Kachalin // Inzhenernyj vestnik Dona. – 2014. – № 1. – [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_22_Baranov.pdf_2226.pdf. Data obrashhenija 15.03.2014.
19. Shalobaev, E.V. Teoreticheskie i prakticheskie problemy razvitija mehatroniki / E.V. Shalobaev // Sb. «Sovremennye tehnologii» / pod. red. S.A. Kozlova. – SPb.: GUITMO. – 2001. – S. 46-66.

20. Shalobaev, E.V. K voprosu ob opredelenii mehatroniki i ierarhija mehatronnyh ob#ektov / E.V. Shalobaev // Datchiki i sistemy. – 2001. – № 7. – S. 64-67.
21. Shalobaev, E.V. Mechatronics: Today Problems and Development trends of Terminology / E.V. Shalobaev // Proceeding 23th Working Meeting of the IFToMM Permanent Commission for Standardization of Terminology on MMS. – Minsk-Gomel. – Belarus. – June 21 – June 26. – 2010. – P. 111-118.
22. Petrov, S.Ju., Shalobaev E.V. Universal'nye registrirujushhie i pokazyvajushhie pribory kak jelement ierarhii mehatronnyh ob#ektov / S.Ju. Petrov, E.V. Shalobaev // Mehatronika. – 2001. – № 5. – C. 29-34.
23. Shalobaev, E.V. Terminologicheskie aspekty sovremennoj mehatroniki / E.V. Shalobaev, R.-T. Tolochka // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologij. – 2013. – № 5. – S. 122-133.
24. Shalobaev, E.V. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiya osnovnyh ponjatij v oblasti mehatroniki / E.V. Shalobaev, R.-T. Tolochka // Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij mehaniki i optiki. – 2014. – № 1. – S. 156-165.
25. Zaguskin, S.L. Novoe pokolenie programmno-apparatnyh lecebno-diagnosticheskikh ustrojstv / S.L. Zaguskin // Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. – 2010. – № 8. – C. 69-75.

Shalobaev Evgeniy Vasil'evich

St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg
Candidate of Technical Sciences, Professor
Tel.: (812) 592-02.94, +7-921-988-00-86
E-mail: shalobaev47@mail.ru

Dunaev Andrey Valer'evich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Candidate of Technical Sciences, associate professor of “Instrument Engineering Metrology and Certification”, leading research fellow of Scientific-Educational Center “Biomedical Engineering”
Tel.: +7 4862 41 98 76, +7-919-261-99-06.
E-mail: dunaev@bmccenter.ru

Kozyreva Olga Dmitrievna

St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg
Student
Tel.: +7 921 989 50 85
E-mail: kozyreva.o@list.ru

УДК 629.7.017.1+519.852

Г.Н. ЛЕБЕДЕВ, ТИН ПХОН ЧЖО, ЗО МИН ТАЙК, ДАО НГОК ТХАЙ

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНЫМ ДВИЖЕНИЕМ НАЗЕМНОГО И ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА ПРИ ИХ СБЛИЖЕНИИ

Ставится задача одновременного контроля безопасности попутного движения воздушного и наземного транспорта и управления с помощью автоматических средств. Предложена объединенная двухуровневая структура контроля и управления, обеспечивающая с помощью адаптивной перестройки регуляторов необходимую безопасность полета при попутном движении во время захода на посадку.

Ключевые слова: контроль безопасности, оптимальное управление, летательные аппараты, динамическое программирование, функция риска.

Введение

Человек при ручном управлении испытывает реальные ощущения нарастания тревоги в случае недопустимого снижения безопасности движения, что вызывает последующую перестройку способа движения судов внутри воздушного эшелона при заходе на посадку. Поэтому целью настоящей работы является воспроизведение поведения человека путем количественной оценки текущего риска в движении и последующей перестройки системы управления на примере входа воздушного судна в эшелон на заданную линию пути [1, 2, 3].

1 Постановка задачи

1.1 На рисунке 1 приведена картина сближения воздушных судов при попутном движении.

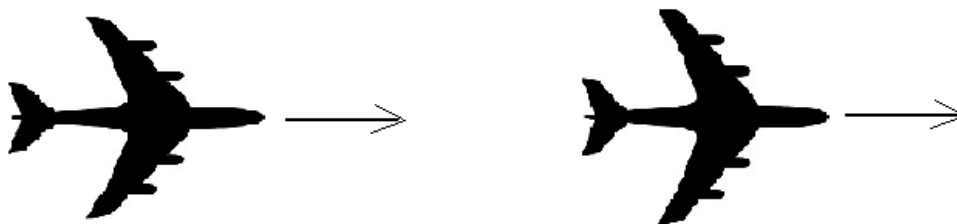


Рисунок 1 – Картина сближения воздушных судов при попутном движении

Заданы уравнения движения транспорта:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = d_1 x_2 + w_1; \\ \dot{x}_2 = -a_1 x_2 + b_1 u_1. \end{cases} \quad (1)$$

Задан другой транспорт, двигающийся по закону:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = d_2 e_2 + w_2; \\ \dot{e}_2 = -a_2 e_2 + b_2 u_2. \end{cases}$$

Рассмотрим случай, когда другой транспорт движется с непредсказуемой, меняющейся скоростью w_2 ; т.е. $d_1 = 1$, $d_2 = 0$, $\dot{e}_2 = 0$, $w_1 = 0$. Тогда мы решаем заданную задачу на основе следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -a_1 x_2 + b_1 u_1; \\ \dot{e}_1 = w_2, \end{cases}$$

где x_1 – координата транспорта по поступательному движению;

x_2 – поступательная скорость транспорта;

e_1 – координата поступательного движения другого транспорта;

w_2 – скорость движения другого транспорта.

1.2 Задан интегральный критерий качества:

$$J = \int_0^{t_k} f_0(\bar{x}, u, t) dt, \quad (2)$$

где $f_0 = r_0 \frac{u^2}{2} + r_1 \frac{1}{2} [(e_1 - x_1) - (C_0 + Nw_2)]^2 + r_2 \frac{1}{2} (x_2 - w_2)^2 + M_2(x_2 - w_2) - M_1(e_1 - x_1), \quad (3)$

(3) – подынтегральное выражение функционала J , учитывающего штраф r_1 за приближение к другому транспорту, штраф r_2 за отклонение скоростей и штраф r_0 за потраченную мощность при управлении [4-6];

r_0 – штраф за квадратное управление рулём;

r_1 – штраф за приближение к другому транспорту;

r_2 – штраф за отклонение скоростей;

C_0 – безопасное расстояние между управляемым объектом и другим транспортом;

$C_0 + Nw_2$ – минимальная безопасная дистанция между двумя транспортными средствами при заданном значении коэффициента N ;

a_1, b_1 – коэффициенты управления;

M_1 – коэффициент, учитывающий отклонение траектории движения двух транспортных средств и M_2 – коэффициент, учитывающий отклонение их скоростей движения.

Требуется решить прямую и обратную задачи оптимизации. В прямой задаче нужно найти функцию управления $u_2 = f(x_1, x_2)$, в обратной задаче – при известных $x_1(t), x_2(t), u_2(t)$ нужно найти r_0, r_1, r_2 критерия.

2 Решение прямой задачи методом динамического программирования [4]

2.1 Функция Беллмана записывается таким образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 e_1 + \gamma_1 \frac{x_1^2}{2} + \gamma_2 \frac{x_2^2}{2} + \gamma_3 \frac{e_1^2}{2} + \psi_{12} x_1 x_2 + \psi_{13} x_1 e_1 + \psi_{23} x_2 e_1; \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} &= \beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} e_1; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_2} = \beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1; \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial e_1} &= \beta_3 + \gamma_3 e_1 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2; \\ -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \min_u \left\{ f_0 + \sum \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} x_i \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 Запишем уравнение Беллмана и представим его ε степенным полиномом [7]:

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & r_0 \frac{u_2^2}{2} + r_1 \frac{[(e_1 - x_1) - (C_0 + Nw_2)]^2}{2} + r_2 \frac{(x_2 - w_2)^2}{2} - M_1(e_1 - x_1) + \\
 & + M_2(x_2 - w_2) + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} e_1) x_1' + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1) x_2' + \\
 & + (\beta_3 + \gamma_3 e_1 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2) e_1';
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & r_0 \frac{u_2^2}{2} + r_1 \frac{[(e_1 - x_1) - (C_0 + Nw_2)]^2}{2} + r_2 \frac{(x_2 - w_2)^2}{2} - M_1(e_1 - x_1) + \\
 & + M_2(x_2 - w_2) + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} e_1) x_2 + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1)(-a_2 x_2 + b_2 u_2) + \\
 & + (\beta_3 + \gamma_3 e_1 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2) w_2.
 \end{aligned}$$

2.3 Оптимизируем функцию Беллмана по параметру u_2 , получаем таким образом:

$$f(u_2) = r_0 \frac{u_2^2}{2} + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1) b_2 u_2; \tag{6}$$

$$f'(u_2) = r_0 u_2 + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1) b_2 = 0$$

$$\Rightarrow u_{2\text{опт}} = -\frac{b_2}{r_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1). \tag{7}$$

Подставим $u_{2\text{опт}}$ (7) в выражение (6), получим:

$$f(u_{2\text{опт}}) = -\frac{b_2^2}{2r_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1)^2. \tag{8}$$

Подставим функцию $f(u_{2\text{опт}})$ (8) в уравнение Беллмана (5) и представим правую часть уравнения Беллмана степенным рядом:

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & \frac{r_1}{2} [(e_1 - x_1) - (C_0 + Nw_2)]^2 + \frac{r_2}{2} (x_2 - w_2)^2 - M_1(e_1 - x_1) + M_2(x_2 - w_2) + \\
 & + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} e_1) x_2 - (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1) a x_2 + \\
 & + (\beta_3 + \gamma_3 e_1 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2) w_2 - \frac{b_2^2}{2r_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1)^2; \\
 -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & \left[r_1 C_0 + r_1 N w_2 + M_1 + \psi_{13} w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12} \beta_2 \right] x_1 + (-r_2 w_2 + M_2 + \beta_1 - \beta_2 a_2 + \psi_{23} w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \beta_2 \gamma_2) x_2 + \\
 & + (-r_1 C_0 - r_1 N w_2 - M_1 + \gamma_3 w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \beta_2 \psi_{23}) e_1 + (r_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12}^2) \frac{x_1^2}{2} + (r_2 + 2\psi_{12} - 2\gamma_2 a_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \gamma_2^2) \frac{x_2^2}{2} + \\
 & + (r_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{23}^2) \frac{e_1^2}{2} + (\gamma_1 - a_2 \psi_{12} - \frac{b_2^2}{r_0} \gamma_2 \psi_{12}) x_1 x_2 + (-r_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12} \psi_{23}) x_1 e_1 + \\
 & + (\psi_{13} - \psi_{23} a_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{23} \gamma_2) x_2 e_1 + [\frac{r_1}{2} (C_0 + N w_2)^2 + \frac{r_2}{2} w_2^2 + M_2 w_2 + \beta_3 w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \beta_2^2].
 \end{aligned} \tag{9}$$

2.4 Приравнявая сомножители при одинаковых степенях и группируя их по степеням, получим систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 & \bullet \beta_1 x_1 = \left[r_1 C_0 + r_1 N w_2 + M_1 + \psi_{13} w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12} \beta_2 \right] x_1; \\
 & \bullet \beta_2 x_2 = (-r_2 w_2 + M_2 + \beta_1 - \beta_2 a_2 + \psi_{23} w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \beta_2 \gamma_2) x_2; \\
 & \bullet \beta_3 e_1 = (-r_1 C_0 - r_1 N w_2 - M_1 + \gamma_3 w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \beta_2 \psi_{23}) e_1; \\
 & \bullet \gamma_1 \frac{x_1^2}{2} = (r_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12}^2) \frac{x_1^2}{2}; \\
 & \bullet \gamma_2 \frac{x_2^2}{2} = (r_2 + 2\psi_{12} - 2\gamma_2 a_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \gamma_2^2) \frac{x_2^2}{2}; \\
 & \bullet \gamma_3 \frac{e_1^2}{2} = (r_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{23}^2) \frac{e_1^2}{2}; \\
 & \bullet \psi_{12} x_1 x_2 = (\gamma_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \gamma_2 \psi_{12} + \gamma_1 d - a_2 \psi_{12}) x_1 x_2; \\
 & \bullet \psi_{13} x_1 e_1 = (-r_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12} \psi_{23}) x_1 e_1; \\
 & \bullet \psi_{23} x_2 e_1 = (\psi_{13} - \psi_{23} a_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{23} \gamma_2) x_2 e_1.
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2.5 Заменяем дифференциальные уравнения алгебраическими при $-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0$:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & r_1 C_0 + r_1 N w_2 + M_1 + \psi_{13} w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12} \beta_2 = 0; \\
 & -r_2 w_2 + M_2 + \beta_1 - \beta_2 a_2 + \psi_{23} w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \beta_2 \gamma_2 = 0; \\
 & -r_1 C_0 - r_1 N w_2 - M_1 + \gamma_3 w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \beta_2 \psi_{23}; \\
 & (r_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12}^2) = 0; \\
 & r_2 + 2\psi_{12} - 2\gamma_2 a_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \gamma_2^2 = 0; \\
 & r_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{23}^2 = 0; \\
 & \gamma_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \gamma_2 \psi_{12} + \gamma_1 d - a_2 \psi_{12}; \\
 & -r_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12} \psi_{23}; \\
 & \psi_{13} - \psi_{23} a_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{23} \gamma_2.
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

После преобразования всех уравнений, их взаимной замены системы уравнений (11) и из 5-го уравнения этой системы, если пренебрежем составным элементом $-\frac{b_2^2}{r_0}\gamma_2^2 \approx 0$, то окончательно находим нижеследующее решение:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_1 = r_2 w_2 + (a_2 + \frac{b_2^2}{r_0})\beta_2 - M_2 + w_2 \psi_{23}; \\ \beta_2 = \frac{r_0(\eta_1 C_0 + \eta_1 N w_2 + M_1 + \psi_{13} w_2)}{b_2^2 \psi_{12}}; \\ \gamma_1 = \psi_{12}(a_2 + \frac{b_2^2}{r_0}\gamma_2); \\ \gamma_2 = \frac{r_2 + 2\psi_{12}}{2a_2}; \\ \gamma_3 = \frac{(\frac{b_2^2}{r_0}\beta_2 \psi_{23} + \eta_1 C_0 + \eta_1 N w_2 + M_1)}{w_2}; \\ \psi_{12} = \sqrt{\eta_1 r_0} / b_2; \\ \psi_{13} = \psi_{23}(a_2 + \frac{b_2^2}{r_0}\gamma_2); \\ \psi_{23} = -\psi_{12}. \end{array} \right. \quad (12)$$

Подставим четыре составляющих $\beta_2, \gamma_2, \psi_{12}, \psi_{23}$ решения (12) в выражение $u_{2\text{опт}} = -\frac{b_2}{r_0}(\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1)$ и получим:

$$u_2 = -\frac{b_2}{r_0} \left\{ \frac{r_0(\eta_1 C_0 + \eta_1 N w_2 + M_1 + \psi_{13} w_2)}{b_2^2 \psi_{12}} + \frac{r_2 + 2\psi_{12}}{2a_2} x_2 + \sqrt{\eta_1 r_0} / b_2 x_1 - \psi_{12} e_1 \right\}. \quad (13)$$

Подставим полученную функцию u в выражение (1), получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -a_2 x_2 + b_2 u_2 \\ \dot{e}_1 = w_2 \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -a_2 x_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \left\{ \frac{r_0(\eta_1 C_0 + \eta_1 N w_2 + M_1 + \psi_{13} w_2)}{b_2^2 \psi_{12}} + \frac{r_2 + 2\psi_{12}}{2a_2} x_2 + \sqrt{\eta_1 r_0} / b_2 x_1 - \psi_{12} e_1 \right\} \\ \dot{e}_1 = w_2 \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -(a_2 + \frac{b_2^2}{r_0} \frac{r_2 + 2\psi_{12}}{2a_2}) x_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \sqrt{\eta_1 r_0} / b_2 x_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12} e_1 - \frac{b_2^2}{r_0} \frac{r_0(\eta_1 C_0 + \eta_1 N w_2 + M_1 + \psi_{13} w_2)}{b_2^2 \psi_{12}}; \\ \dot{e}_1 = w_2. \end{array} \right. \quad (14)$$

3 Моделирование обхода препятствия на примере

Моделирование системы управления попутным движением [7] проводилось при условиях: $r_0 = 1, \eta_1 = 200, r_2 = 16, d = 1, D = 20$ м, $C_0 = 10$ м, $a_2 = 0,5, b_2 = 0,5, C_1 = 0$ м/с.

Результаты моделирования при попутном движении двух воздушных судов показаны на рисунке 2.

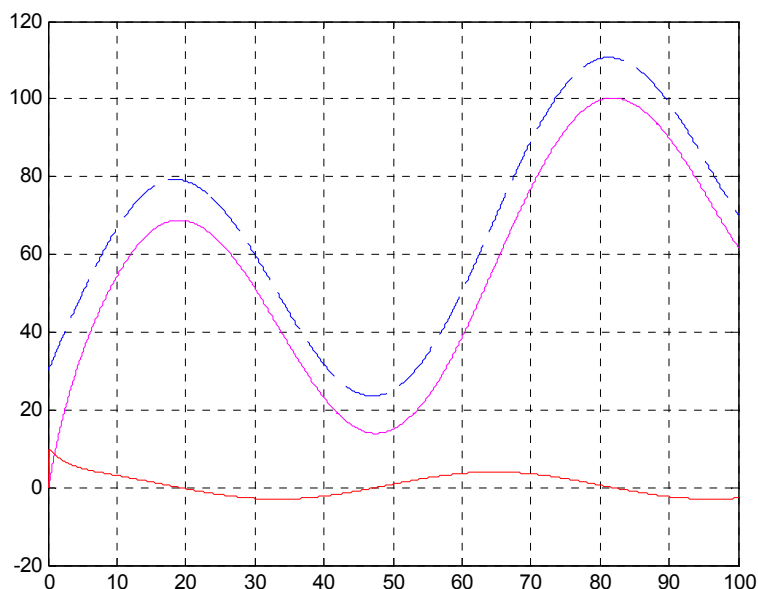


Рисунок 2 – Результаты моделирования при попутном движении двух воздушных судов

Из рисунка видно, что между судами существует определенная безопасная дистанция, несмотря на внезапное замедление скорости впередилетающего судна.

4 Выводы

1. Найдено оптимальное управление безопасным попутным движением воздушных судов в виде алгоритма, имеющего на своем входе координаты бокового движения воздушного судна x_1 и x_2 , координаты y_1 и z поступательного и бокового движения другого воздушного судна, а также скорости v_1 и v_2 поступательного и бокового движения двух судов.

2. Синтезированная система управления может использоваться для автоматической подсказки летчику и диспетчерской наземной службе о возникновении сигнала тревоги при опасном сближении воздушных судов.

Работа выполнена при материальной поддержке гранта РФФИ 13-08-00182.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимальное управление и контроль безопасности поперечного движения речных и воздушных судов при пересечении их маршрутов / Г.Н. Лебедев, Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк, Г.Ф. Хахулин, В.Б. Малыгин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 12. – С. 50-55.
2. Автоматический контроль безопасности сближения двух управляемых воздушных судов при пересечении их маршрутов / А.В. Зайцев, Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк, Бу Суан Хыон // Научный вестник. – 2013. – № 198 (12). – 2013. – С. 51-59.
3. Лебедев, Г.Н. Система обеспечения безопасности при попутном движении воздушных или речных судов и пересечении их маршрутов / Г.Н. Лебедев, Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк // Известия Тульского государственного института. – 2012. – № 7. – С. 90-98.
4. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: ИИЛ. – 1961. – 400 с.
5. Теория оптимальных систем / Ю.С. Гришанин, Г.Н. Лебедев, А.В. Липатов, Г.А. Степаньянц. – М.: МАИ. – 1999. – 317 с.
6. Лётов, А.М. Динамика полета и управления. – М.: Наука. – 1969. – 369 с.
7. Лебедев, Г.Н. Решение задачи динамического программирования при безопасном попутном движении воздушных судов / Г.Н. Лебедев, Тин Пхон Чжо, Чан Ван Туен // Труды МАИ. – 2012. – № 54.

Лебедев Георгий Николаевич

Московский авиационный институт (НИУ)
Зам. зав. кафедрой МАИ
Тел. +7(499)158-4462, +7(916)306-9284
E-mail: kaf301@mai.ru

Тин Пхон Чжо

Московский авиационный институт (НИУ)
Кандидат технических наук, докторант
Тел. 8(925)046-0630
E-mail: thtthtweaung@gmail.com

Зо Мин Тайк

Московский авиационный институт (НИУ)
аспирант
Тел. 8-926-749-67-96
E-mail: zawminhtike147@gmail.com

Дао Нгок Тхай

Московский авиационный институт (НИУ)
аспирант
Тел.: 8-967-083-13-08
E-mail: dthaihn@yahoo.com

G.N. LEBEDEV, TIN PHONE KYAW, ZAW MIN HTIKE, DAO NGOC THAI

**ASSIGNING DYNAMIC PRIORITIES WHEN SERVICING
AIRCRAFT WITH AN ARBITRARY RATE DURING
APPROACH AND LANDING FLIGHT IN FORMATION**

The problem is the simultaneous control of the security accompanying the movement of aircraft and control by automatic means. We propose a combined two-tier structure and control that provides with an adaptive adjustment controls necessary safety of flight in a passing motion during the approach.

Keywords: *safety control, optimal control, aircraft, dynamic programming, function of risk.*

BIBLIOGRAPHY

1. Optimal'noe upravlenie i kontrol' bezopasnosti poperechnogo dvizhenija rechnyh i vozдушnyh sudov pri peresechenii ih marshrutov / G.N. Lebedev, Tin Phon Chzho, Zo Min Tajk, G.F. Hahulin, V.B. Malygin // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2012. – № 12. – С. 50-55.
2. Avtomaticheskij kontrol' bezopasnosti sbliženija dvuh upravljaemyh vozдушnyh sudov pri peresechenii ih marshrutov / A.V. Zajcev, Tin Phon Chzho, Zo Min Tajk, Bu Suan Hyon // Nauchnyj vestnik. – 2013. – № 198 (12). – 2013. – S. 51-59.
3. Lebedev, G.N. Sistema obespečenija bezopasnosti pri poputnom dvizhenii vozдушnyh ili rechnyh sudov i peresechenii ih marshrutov / G.N. Lebedev, Tin Phon Chzho, Zo Min Tajk // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo instituta. – 2012. – № 7. – S. 90-98.
4. Bellman, R. Dinamicheskoe programmirovanie / R. Bellman. – M.: IIL. – 1961. – 400 s.
5. Teorija optimal'nyh sistem / Ju.S. Grishanin, G.N. Lebedev, A.V. Lipatov, G.A. Stepan'janc. – M.: MAI. – 1999. – 317 s.
6. Ljotov, A.M. Dinamika poleta i upravlenija. – M.: Nauka. – 1969. – 369 s.
7. Lebedev, G.N. Reshenie zadachi dinamicheskogo programmirovaniya pri bezopasnom poputnom dvizhenii vozдушnyh sudov / G.N. Lebedev, Tin Phon Chzho, Chan Van Tuen // Trudy MAI. – 2012. – № 54.

Lebedev Georgiy Nikolaevich

Moscow Aviation Institute
Deputy head of Moscow Aviation Institute (National Research University)
Phone: +7(499)158-4462, +7(916)306-9284
E-mail: kaf301@mai.ru

Tin Phone Kyaw

Moscow Aviation Institute
Candidate of Engineering Science, doctorate
Phone: 8(925) 046-0630
E-mail: thehtweaung@gmail.com

Zaw Min Htike

Moscow Aviation Institute
Postgraduate
Phone: 8-926-749-67-96
E-mail: zawminhtike147@gmail.com

Dao Ngoc Thai

Moscow Aviation Institute
Postgraduate
Phone: 8-967-083-13-08
E-mail: dthaihn@yahoo.com

ВОПРОСЫ УСТОЙЧИВОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В статье рассматриваются основные методы анализа устойчивости систем и излагается новый метод анализа устойчивости сложных систем.

Показано, что понятие устойчивости является одним из центральных в теории систем. Установлено, что устойчивость системы во многом определяет ее работоспособность и надежность.

Определено, что анализ устойчивости сложных систем традиционными методами труднореализуем. Предложенный метод анализа устойчивости ВЭМАУСС позволяет достаточно просто анализировать устойчивость сложных систем.

Ключевые слова: информационно-измерительные системы и управляющие системы, электромеханические комплексы, устойчивость систем.

Одной из основных задач проектирования сложных технологических электромеханических комплексов (промышленных роботов, станков, робокар и т.д.) является обеспечение устойчивости [1, 2].

В данной работе рассматриваются основные методы анализа устойчивости систем и излагается новый метод анализа устойчивости сложных систем.

Понятие устойчивости является одним из центральных в теории систем. Устойчивость системы во многом определяет ее работоспособность и надежность. В общем виде условие устойчивости имеет следующий вид: заданное невозмущенное движение будет устойчивым, если возмущенное движение, порожденное возмущением, возникшим под действием внезапно приложенных к системе дополнительных внешних сил, по истечении некоторого времени войдет в заданную область [3].

Система будет асимптотически устойчива по Ляпунову А.М., если заданная область стягивается в нулевую точку.

Для определения устойчивости системы применяют различные правила – критерии устойчивости, алгебраические или частотные.

Критерии анализа устойчивости линейных систем

Характерным свойством линейных систем является их устойчивость при больших возмущениях в случае устойчивости при малых возмущениях.

Наиболее часто применяемыми критериями являются критерии Раусса, Гурвица, Найквиста, Михайлова [2].

Критерии и методы анализа устойчивости нелинейных систем

Анализ устойчивости нелинейных систем значительно сложнее, чем линейных. Большинство методов анализа устойчивости нелинейных систем ориентировано на определенные узкие классы таких систем с небольшим количеством типовых нелинейностей (реле, насыщение и т.д.). Наиболее часто применяемыми методами и критериями являются методы и критерии Ляпунова, Попова, гармонической, энергетической линеаризации [2].

Анализ всех вышеперечисленных методов позволяет сделать вывод, что в случае, когда динамику автоматической системы можно описать системой линейных дифференциальных уравнений, проблема анализа устойчивости решается достаточно легко за исключением систем высокого порядка (более 100-го).

В случае, когда динамику автоматической системы можно описать системой нелинейных дифференциальных уравнений, проблема анализа устойчивости решается лишь в отдельных простых случаях – когда либо число нелинейностей мало, либо порядок системы невысок.

Поэтому проблема разработки методов анализа устойчивости сложных систем продолжает оставаться актуальной.

Вероятностный метод анализа устойчивости ВЭМАУС

Представим процесс движения системы, выведенной внешним возбуждением из некоторой области, в виде последовательности случайных событий:

$$Y_0, Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_N,$$

где Y_i – событие, заключающееся в нахождении i координат изображающей точки в пределах, а всех других – вне заданной области; n – число координат изображающей точки.

В этом случае граф состояний такой сложной системы можно представить как на рисунке 1.

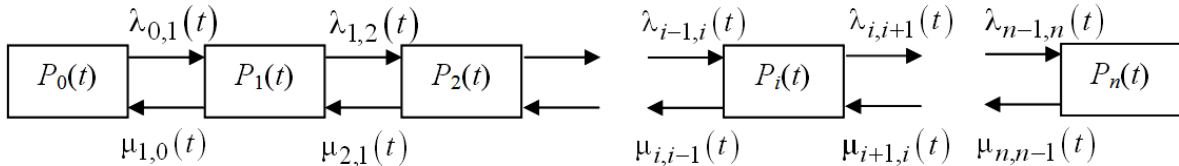


Рисунок 1 – Граф состояний системы

Приняты следующие обозначения:

$P_i(t)$ – вероятность появления i -го события; $\lambda_{i,j}(t)$ – интенсивность перехода от i -го к $i+1$ -му событию; $\mu_{i+1,i}(t)$ – интенсивность перехода от $i+1$ -го к i -му событию.

Если считать закон распределения вероятностей наступления таких событий Пуассоновским (это можно доказать), то их поведение можно описать следующей системой дифференциальных уравнений [4]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= P_0(t)[\lambda_{0,1}(t)] + P_1(t)[\lambda_{1,2}(t) - \mu_{1,0}(t)] + P_2(t)[\mu_{2,1}(t)]; \\ &\dots \\ \frac{dP_n}{dt} &= P_{n-1}(t)[\lambda_{n-1,n}(t)] + P_n(t)[\mu_{n,n}(t)]; \\ 1 &= P_0(t) + P_2(t) + \dots + P_i(t) + \dots + P_n(t). \end{aligned} \tag{1}$$

Для стационарных потоков $\lambda_{i,i+1}; \mu_{i+1,i}$ не зависят от времени.

Решением системы (1) является временная функция $P_n(t)$, определяющая вероятность наступления n -го события (вероятность нахождения n координат изображающей точки в данной малой области), т.е. вероятность устойчивости системы.

Тогда условие устойчивости можно сформулировать следующим образом.

Заданное невозмущенное движение будет устойчивым, если вероятность того, что возмущенное движение, порожденное возмущением, возникшим под действием внезапно приложенных к системе дополнительных внешних сил, по истечении некоторого времени войдет в заданную область, будет больше некоторой доверительной.

Следует отметить, что в случае необходимости установления лишь факта устойчивости системы, достаточно решить систему алгебраических уравнений, вместо системы дифференциальных уравнений вида (1), которая имеет вид для стационарных потоков:

$$\begin{aligned} 0 &= P_0(\lambda_{0,1}) + P_i(\lambda_{1,i} - \mu_{i,0}) + P_2(\mu_{i,1}); \\ &\dots \\ 0 &= P_{n-1}(\lambda_{n-1,n}) + P_n(\mu_{n,n-1}); \\ 1 &= P_0 + P_1 + \dots + P_i + \dots + P_n. \end{aligned} \tag{2}$$

Важным является вопрос об определении интенсивностей потоков событий.

В теории массового обслуживания используются следующие формулы для определения интенсивностей потоков событий [4]:

$$\lambda_{i,i+1} = \frac{n-i}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_j; \tag{3}$$

$$\mu_{i+1,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mu_j,$$

где λ_j, μ_j – интенсивности отдельных потоков, зависящие от параметров системы.

Задача определения интенсивностей потоков является очень сложной и важной. В работе предлагается определить зависимости интенсивностей потоков λ_j, μ_j от параметров системы исходя из равенства результатов анализа устойчивости отдельных электроприводов предлагаемым и классическим методами, например методом Найквиста.

В качестве объектов исследования рассматриваются информационно-измерительные и управляющие системы сложных технологических электромеханических комплексов, построенных по схемам с подчиненным регулированием параметров и содержащих контуры скорости и положения [3].

Определение интенсивностей потоков контуров скорости

Структурная схема контура скорости представлена на рисунке 2.

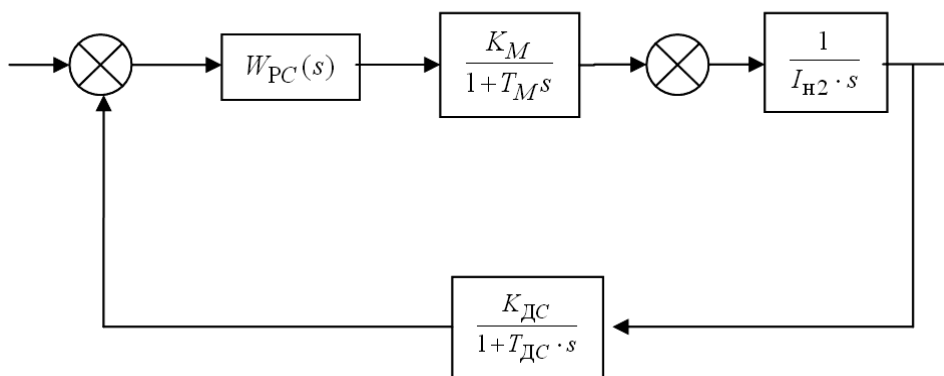


Рисунок 2 – Структурная схема контура скорости

Контур скорости обычно настраивают на симметричный оптимум, тогда

$$W_{PC}(s) = \frac{I_{ДВ} \cdot (1 + 4T_M \cdot s)}{8 \cdot T_M^2 \cdot K_M \cdot K_{DC} \cdot s} = \frac{K_{PC} \cdot (1 + T_{PC} \cdot s)}{s}, \tag{4}$$

где Δt – время квантования.

Определение интенсивностей потоков контуров положения

Структурная схема контура положения представлена на рисунке 3.

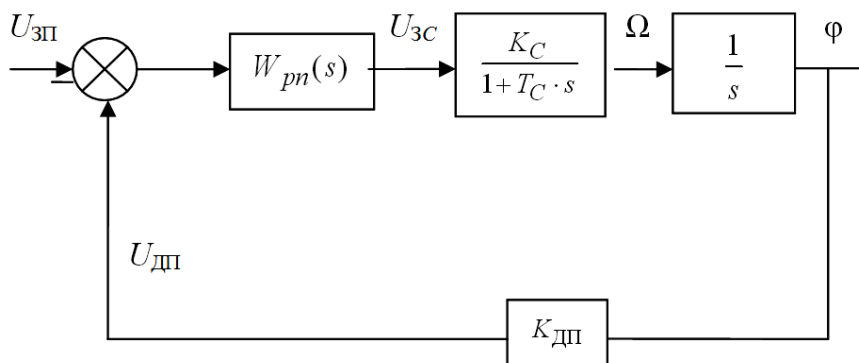


Рисунок 3 – Структурная схема контура положения

На схеме учтено, что передаточную функцию замкнутого контура скорости приближенно можно записать в следующем виде:

$$\Phi_{3C}(s) \approx \frac{1}{K_{DC} \left(1 + \frac{2T_M}{K_J} s \right)} = \frac{K_C}{1 + T_C s}. \quad (5)$$

Контур положения настраивают на технический оптимум λ , тогда

$$W_{pn}(s) = \frac{1}{2} (T_C \cdot K_C \cdot K_{ДП}). \quad (6)$$

На основе теоретических и экспериментальных исследований были получены зависимости интенсивностей потоков событий контуров скорости и положения от параметров контуров, которые имеют вид [4, 5, 8]:

$$\lambda_{iC} = F_{1Ci}(T_{Mi}, K_{ji}, K_{kvi}, \Delta U_{\Pi i}); \quad (7)$$

$$\lambda_{i\Pi} = F_{2\Pi i}(T_{Mi}, K_{ji}, K_{kvi}, \Delta U_{\Pi i}); \quad (8)$$

$$\mu_{iC} = F_{3Ci}(T_{Mi}, K_{ji}, K_{kvi}, \Delta U_{\Pi i}); \quad (9)$$

$$\mu_{i\Pi} = F_{4\Pi i}(T_{Mi}, K_{ji}, K_{kvi}, \Delta U_{\Pi i}), \quad (10)$$

где K_{ij} – коэффициент изменения момента инерции i -го электропривода;

$\Delta U_{\Pi i}$ – изменение напряжения питания i -го электропривода при интенсивных перемещениях;

K_{kvi} – коэффициент, учитывающий эффекты квантования по уровню:

$K_{kv} = 0,8$ – при квантовании с округлением; $K_{kv} = 1,5$ – при квантовании без округления.

В качестве примера рассмотрим систему следящих приводов робота промышленного СУР-МС, обладающего следующими характеристиками [6]:

- число степеней подвижности – 6;
- контуры скорости – аналоговые на базе преобразователей ПРШ-102 с двигателями МИ-2 и тахогенераторами ТП-80;
- контуры положения – цифровые с временем квантования $\Delta t_i = 0,002$ с и квантованием типа округления;
- постоянные времени контуров тока $T_{Mi} = 0,001$ с ;
- коэффициенты изменения моментов инерции:

$$\begin{aligned} K_{J1} &= 0,5 \div 2; \\ K_{J2} &= 0,5 \div 1,5; \\ K_{J3} &= 0,8 \div 1,2; \\ K_{J4} &= K_{J5} = K_{J6} = 0,8 \div 1,1. \end{aligned} \quad (11)$$

Интенсивности потоков имеют вид:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 82; \mu_1 = 1; \lambda_2 = 100; \mu_2 = 2; \lambda_3 = 100; \mu_3 = 1,5; \lambda_4 = 75; \mu_4 = 2,5; \lambda_5 = 170; \mu_5 = 0,6; \lambda_6 = 60; \\ \mu_6 &= 3; \lambda_7 = \lambda_9 = \lambda_{11} = 170; \lambda_8 = \lambda_{10} = \lambda_{12} = 50; \mu_7 = \mu_9 = \mu_{11} = 0,5; \mu_8 = \mu_{10} = \mu_{12} = 3. \\ \lambda_{0,1} &= 1247; \mu_{1,0} = 1,75; \lambda_{1,2} = 1147; \lambda_{2,3} = 1047; \lambda_{3,4} = 947; \lambda_{4,5} = 847; \lambda_{5,6} = 747; \lambda_{6,2} = 647; \\ \lambda_{7,8} &= 547; \mu_{8,8} = 447; \lambda_{9,10} = 347; \lambda_{10,11} = 247; \lambda_{11,12} = 147. \\ \mu_{2,1} &= 3,5; \mu_{3,2} = 5,2; \mu_{4,3} = 7; \mu_{5,4} = 8,7; \mu_{6,5} = 9,5; \mu_{7,6} = 11,3; \mu_{8,7} = 13; \mu_{9,8} = 14/8; \\ \mu_{10,9} &= 16,5; \mu_{11,10} = 18,3; \mu_{4,3} = 7; \mu_{12,11} = 20. \end{aligned}$$

Уравнение типа (2) имеет вид [7, 9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = 1247 \cdot P_0 - (1148)P_1 + 3,5 \cdot P_2; \\ 0 = 1147 \cdot P_1 - (1050)P_2 + 5,2 \cdot P_3; \\ 0 = 1047 \cdot P_2 - (952)P_3 + 7 \cdot P_4; \\ 0 = 947 \cdot P_3 - (850)P_4 + 8,7 \cdot P_5; \\ 0 = 847 \cdot P_4 - (760)P_5 + 9,5 \cdot P_6; \\ 0 = 747 \cdot P_5 - (660)P_6 + 11,3 \cdot P_7; \\ 0 = 647 \cdot P_6 - (560)P_7 + 13 \cdot P_8; \\ 0 = 547 \cdot P_7 - (460)P_8 + 15 \cdot P_9; \\ 0 = 447 \cdot P_8 - (360)P_9 + 16 \cdot P_{10}; \\ 0 = 347 \cdot P_9 - (265)P_{10} + 18 \cdot P_{11}; \\ 0 = 247 \cdot P_{10} - (170)P_{11} + 20 \cdot P_{12}; \\ 1 = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_{12}. \end{array} \right. \quad (12)$$

Откуда $P_{12} = 0,87$; $P = 0,11$, а доверительная вероятность равна $(0,985)^{12} = 0,83$, т.е. ИИУС устойчива.

Из проведенного исследования видно, что анализ устойчивости сложных систем традиционными методами труднореализуем. Метод анализа устойчивости ВЭМАУСС позволяет достаточно просто анализировать устойчивость сложных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обработка оборудования нового поколения. Концепция проектирования / Под ред. В.Л. Афонина. – М.: Машиностроение. – 2001. – 256 с.
2. Васильев, А.М. Оценка эффективности комплексного контроля качества в распределенных информационно-измерительных системах / А.М. Васильев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2(286). – С. 167-174.
3. Малкин, И.Г. Теория устойчивости движения / И.Г. Малкин. – М.: Наука. – 1966. – 530 с.
4. Кнауэр, И.Б. Вероятностный метод анализа устойчивости промышленных роботов / И.Б. Кнауэр, В.В. Слепцов // Станкостроение: базовые информационные технологии: Сб. научных трудов ЭНИМС / Под. ред. Б.И. Черпакова. – М.: ЭНИМС, 2001. – С. 50-57.
5. Слепцов, В.В. Электроприводы промышленных роботов. Концепция проектирования / В.В. Слепцов, В.И. Картавец, А.А. Лукин. – М.: МГАПИ. – 2003. – 76 с.
6. Слепцов, В.В. Распределенные информационно-измерительные системы в гибких автоматизированных производствах. Концепция проектирования / В.В. Слепцов, В.К. Гарипов. – М.: МГАПИ, 2004. – 150 с.
7. Автоматизация измерений, контроля и управления / В.Г. Лукашкин, В.К. Гарипов, В.В. Слепцов, А.В. Вишняков. – М.: Машиностроение-1. – 2005. – 670 с.
8. Анализ основных конструкций электроприводов для автоматизированного производства / В.В. Слепцов, Н.А. Олейников, А.Н.Федотов, И.И. Прокуратов // Дизайн. Теория и практика (Пополняемое электронное научное издание). – № 14. – С. 70-79.
9. Слепцов, В.В. Повышение точности и быстродействия робототехнических транспортных устройств за счет совершенствования их информационно-измерительных и управляющих систем // Сб. тр. 9-й Всерос. научн.-практ. конф. «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве». – Новокузнецк. – 2013. – С. 311-316.

Слепцов Владимир Владимирович

МГУПИ, Москва

Доктор технических наук, профессор кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»

Тел.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupir1@mail.ru

Васильев Андрей Михайлович

МГУПИ, Москва

К.т.н., ст. преподаватель кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»

Тел.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupir1@mail.ru

Прокуратов Иван Иванович

МГУПИ, Москва

Аспирант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»

Тел.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupir1@mail.ru

Федотов Андрей Николаевич

МГУПИ, Москва

Аспирант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»

Тел.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupipr1@mail.ru

V.V. SLEPCOV, A.M. VASILYEV, I.I. PROKURATOV, A.N. FEDOTOV

QUESTIONS OF STABILITY OF INFORMATION-MEASURING AND OPERATING SYSTEMS OF ELECTROMECHANICAL COMPLEXES

The article considers the basic methods of the analysis of stability of systems and introduces a new method of analysis of stability of complex systems.

It is shown that the notion of sustainability is one of the Central problems in the theory of systems. It is established that the sustainability of the system determines its performance and reliability.

Determined that the analysis of stability of complex systems traditional methods трудно реализуем. The proposed method for the analysis of stability VEMAUSS allows to analyse the stability of complex systems.

Keywords: *information and measuring systems and control systems, Electromechanical complexes, stability of systems.*

BIBLIOGRAPHY

1. Obrabatyvajushhee oborudovanie novogo pokolenija. Konceptija proektirovanija / Pod red. V.L. Afoni-na. – M.: Mashinostroenie. – 2001. – 256 s.
2. Vasil'ev A.M. Ocenka jeffektivnosti kompleksnogo kontrolja kachestva v raspredelennyh informacionno-izmeritel'nyh sistemah // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2011. – № 2(286). – S. 167-174.
3. Malkin, I.G. Teorija ustojchivosti dvizhenija. – M.: Nauka. – 1966. – 530 s.
4. Knaujer I.B., Slepcev V.V. Veroyatnostnyj metod analiza ustojchivosti promyshlennyh robotov // Stankostroenie: bazovye informacionnye tehnologii: Sb. nauchnyh trudov JeNIMS / Pod. red. B.I. Cherepa-nova. – M.: 2001. – S. 50-57.
5. Slepcev V.V., Kartavcev V.I., Lukin A.A. Jelektroprivody promyshlennyh robotov. Konceptija proektirovanija. – M.: MGAPI. – 2003. – 76 s.
6. Slepcev V.V., Garipov V.K. Raspredelennye informacionno-izmeritel'nye sistemy v gibkikh avtomatizirovannyh proizvodstvah. Konceptija proektirovanija. – M.: 2004. – 150 s.
7. Lukashkin V.G., Garipov V.K., Slepcev V.V., Vishnekov A.V. Avtomatizacija izmerenij, kontrolja i upravlenija. – M.: Mashinostroenie-1. – 2005. – 670 s. il.
8. Slepcev V.V., Olejnikov N.A., Fedotov A.N., Prokuratov I.I. Analiz osnovnyh konstrukcij jelek-troprivodov dlja avtomatizirovannogo proizvodstva // Dizajn. Teorija i praktika (Popolnjaemoe jelektronnoe nauchnoe izdanie). – № 14. – S. 70-79.
9. Slepcev V.V., Vasil'ev A.M., Olejnikov N.A. Povyshenie tochnosti i bystrodejstvija robototehni-cheskih transportnyh ustrojstv za schet sovershenstvovanija ih informacionno-izmeritel'nyh i upravljaju-shhih sistem // Sbornik trudov 9-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Sistemy avtomatizacii v obrazovanii, nauke i proizvodstve». – Novokuzneck. – 2013. – S. 311-316.

Sleptsov Vladimir Vladimirovich

Moscow state University of instrument engineering and Informatics, Moscow

Doctor of technical Sciences, Professor of the Department «Devices and instrumentation systems»

Tel.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupipr1@mail.ru

Prokuratov Ivan Ivanovich

Moscow state University of instrument engineering and Informatics, Moscow

Postgraduate of the Department «Devices and instrumentation systems»

Tel.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupipr1@mail.ru

Vasilyev Andrey Michailovich

Moscow state University of instrument engineering and Informatics, Moscow

Candidate of technical Sciences, senior lecturer of the Department «Devices and instrumentation systems»

Tel.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupipr1@mail.ru

Fedotov Andrey Nikolaevich

Moscow state University of instrument engineering and Informatics, Moscow

Postgraduate of the Department «Devices and instrumentation systems»

Tel.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupipr1@mail.ru

Б.И. ДЕУЛИН

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СПЕКТРОФОТОМЕТР С ЛАЗЕРНЫМ ИСТОЧНИКОМ СВЕТА

Проблеме создания спектрофотометров, способных измерять образцы с высокой оптической плотностью и с автоматизацией измерений, посвящено множество работ. В настоящей статье представлен спектрофотометр с источником света в виде РОС-лазера на органических красителях, обладающий способностью проводить измерения в автоматическом режиме.

Ключевые слова: спектрофотометр, РОС-лазер, органические красители, пьезопластика, накачка.

Фотоколориметры и спектрофотометры, серийно выпускаемые отечественной промышленностью до недавнего времени, например, ФЭК101, ФЭК54М, ФЭК60, ФЭК56 имеют ламповые источники света, которые обладают малой спектральной яркостью. Поэтому, значения измеряемой плотности, как правило, не превышало «2». Тем самым ограничен верхний предел обнаружения исследуемых ингредиентов пробы данным значением плотности. Так, например, при определении меди фотоколориметрическим методом на перечисленных выше приборах с использованием пикамина эпсилон, исследуемый раствор должен содержать 0,5-40 мкг меди, с неокупраином – 2-200 мкг [1]. Если указанный раствор содержит большее количество меди, его необходимо разбавлять. Кроме того, возникают трудности при контроле мутных сред.

Повышение спектральной яркости спектрофотометров развивается по двум направлениям: создание более ярких ламп и применение лазерных источников света. В настоящее время отечественной промышленностью освоен выпуск спектрофотометров с ламповыми источниками света, которые измеряют оптическую плотность до значения «4», например СФ-56 [2]. Ознакомиться с характеристиками современных спектрофотометров можно на электронных ресурсах [2, 3].

При создании спектрофотометров с лазерными источниками света, определенный интерес представляют лазеры со светоиндуцированной распределенной обратной связью, или РОС-лазеры на красителях [4], так как они миниатюрны из-за отсутствия резонатора и в них возможна плавная перестройка частоты, кроме того, они обладают простотой, удобством и надежностью в эксплуатации. Для своего функционирования РОС-лазер не требует сложных устройств типа интерферометра Фабри-Перо.

Принцип действия РОС-лазера основан на том, что при пересечении двух интенсивных монохроматических лучей в прозрачной или поглощающей среде возникает интерференционная картина, вызывающая пространственную модуляцию оптических параметров среды. При этом образуется дифракционная решетка. Если рассеянные волны, при выполнении условий Брега усиливаются в активной среде, то такую решетку можно рассматривать как резонатор с распределенной обратной связью. При этом в каждой, точке периодической структуры волна, распространяющаяся направо, получает «подпитку» за счет брегговского рассеяния энергии от волны, идущей налево, и наоборот. Вследствие этого образуется обратная связь, которая существует по всей длине активного элемента.

В процессе своего развития РОС-лазеры использовали преимущественно два типа сред: жидкие растворы органических красителей, размещенные в кювете, и твердые растворы органических красителей в различных типах полимерных материалов.

Примеры РОС-лазеров на жидких растворах органических красителей и общий вид лазерных элементов приведены на рисунках 1-4.

РОС-лазер на базе «активной призмы» (рис. 1) содержит цилиндрическую телескопическую систему ЦТ, с помощью которой излучение накачки, сформированное в полоску, подается на светоделитель R_1 и делится на два пучка и с помощью вращающихся зеркал R сводится на активный элемент (АС). Входная грань активного элемента находится в контакте с призмой Пр из прозрачного диэлектрика. Одновременным разворотом зеркал осуществляет-

ся изменение угла интерференции пучка накачки в активной среде, тем самым производится перестройка длины волны генерации.

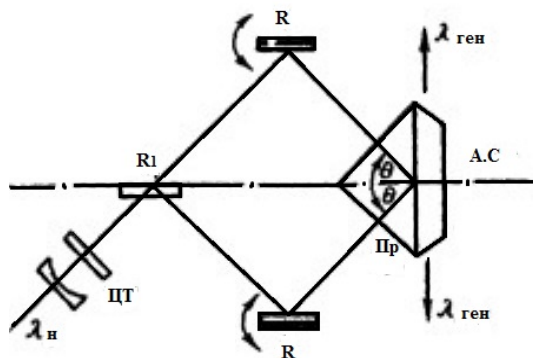


Рисунок 1 – Лазер с распределенной обратной связью на базе «активной призмы»



Рисунок 2 – Общий вид лазерных элементов с «активной призмой»

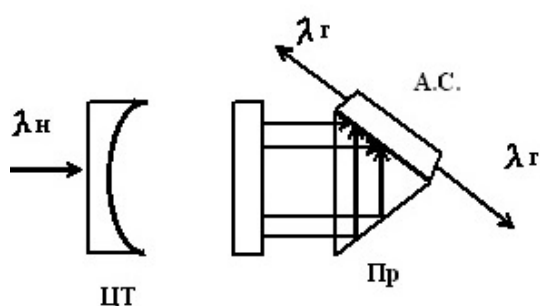


Рисунок 3 – Лазер с распределенной обратной связью на базе «активного катета»

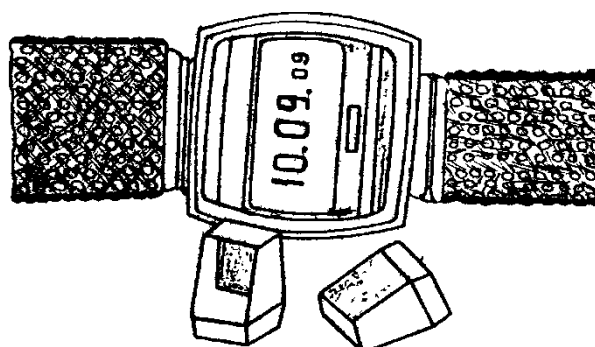


Рисунок 4 – Общий вид лазерных элементов с «активным катетом»

В РОС-лазере на базе «активного катета» (рис. 3) излучение накачки направляется на гипотенузную грань прямоугольной призмы Пр. Одна из катетных граней находится в контакте с генерирующим красителем (АС). Часть излучения проникает в активное тело непосредственно, другая часть – после отражения от противоположной катетной грани. Интерферируя внутри активной среды, пучки накачки создают условия для возникновения генерации на основе РОС. Распределенная обратная связь в активной среде возникает за счет нарушения полного внутреннего отражения на границе призма – активная среда. Соотношение между длинами волн генерации и накачки задается уравнением [1]:

$$\lambda_{\text{ген}} = n_p \cdot \lambda_{\text{нак}} / n_{\text{пр}} \cdot \sin \Theta, \quad (1)$$

где Θ – угол падения излучения накачки на границу призма – активная среда; n_p – показатель преломления активной среды; $n_{\text{пр}}$ – показатель преломления призмы; $\lambda_{\text{нак}}$ – длина волны лазера накачки; $\lambda_{\text{ген}}$ – длина волны излучения.

Одним из недостатков РОС-лазеров на жидких растворах органических красителей является большая чувствительность длины волны генерации к изменению температуры окружающей среды. Для устранения указанного недостатка целесообразно производить замену жидкой активной среды на твердотельную. Такая замена целесообразна еще и удобством в обращении с твердотельным элементом по сравнению с жидкостью.

Кроме того, ряд твердотельных матриц отличается лучшими термооптическими характеристиками по сравнению с общеупотребительными растворителями красителей, что приводит к улучшению генерационных параметров перестраиваемого лазера.

В работе [4] были представлены характеристики лазерных сред на красителях с различными матрицами.

Использование активных элементов на основе эпоксиполимеров в РОС-лазерах кроме обычных преимуществ, связанных с удобством в обращении с твердотельной матрицей, дает в сравнении с раствором возможность существенно повысить температурную стабильность спектральной линии генерации РОС-лазера.

Длина волны генерации лазера может быть определена из выражения (1).

В РОС-лазерах важным фактором, определяющим стабильность длины волны генерации, является температурное изменение показателя преломления активной среды и призмы. Изменение длины волны генерации при изменении температуры излучателя на ΔT , вызванное изменением показателя преломления, определяется формулой [1]:

$$\Delta\lambda_{\text{ген}} = \lambda_{\text{нак}} \left(\frac{1}{n_p} \cdot \frac{dn_p}{dT} - \frac{1}{n_{\text{пр}}} \cdot \frac{dn_{\text{пр}}}{dT} \right) \Delta T, \quad (2)$$

где T – температура излучателя лазера; n_p – показатель преломления активной среды; $n_{\text{пр}}$ – показатель преломления призмы; $\lambda_{\text{нак}}$ – длина волны лазера накачки; $\lambda_{\text{ген}}$ – длина волны излучения.

В жидкостных РОС-лазерах основным источником температурной нестабильности является изменение показателя преломления раствора, порядок которого достигает значения $\sim 10^{-4}$. Использование в качестве материала активного элемента эпоксиполимеров с внедренным красителем, у которого $dn/dT=6 \cdot 10$ град $^{-1}$, позволяет повысить температурную стабильность длины волны генерации РОС-лазера по сравнению с этанолом почти на порядок.

Кроме того, при показателе преломления активного элемента, сравнимом с показателем преломления призмы, возникает возможность взаимной компенсации изменения показателя преломления активного элемента и призмы, т.к. знак изменения dn/dT при одинаковом изменении температуры у большинства веществ одинаков.

С использованием опытных образцов из эпоксиполимера, активированного органическими красителями родамином Ж, родамином С и оксазином 17, размерами $10 \times 15 \times 3$ мм с концентрацией красителя 10^{-3} г/г при накачке от лазера ИАГ:Nd $^{3+}$ с частотой повторения импульсов от 1 Гц до 25 Гц при ширине спектральной линии накачки 0,001 нм была получена генерация на основе РОС с частотой следования импульсов, повторяющих накачку. Ширина спектральной линии генерации составляла 0,04 нм. Диапазон перестройки РОС-лазера на основе родамина Ж – 554-601 нм. Максимальный КПД на длине волны генерации 584 нм – 10 %. Для родамина С диапазон перестройки составил 605-667 нм, максимальный КПД на длине волны 628 нм – 12 %. Лазер на основе оксазина 17 перестраивался в пределах 635-672 нм. Поляризация излучения РОС-лазера во всех случаях совпадала с поляризацией излучения накачки. Активный элемент высотой 2 мм может прогенерировать $0,5 \cdot 10^6$ импульсов при плотности мощности накачки 500 мВт/см 2 без ухудшения генерационных характеристик.

В работе [5] был представлен спектрофотометр с источником света в виде РОС-лазера на органических красителях. Однако данный спектрофотометр снабжен механическим поворотным устройством зеркала лазера, с помощью которого осуществляют регулировку длины волны его излучения. Поэтому измерения требуют значительных затрат времени. Для устранения указанного недостатка в работе [6] был представлен спектрофотометр с поворотным устройством в виде изгибающейся пьезопластины. Однако в этом приборе отсутствует синхронизация во времени работы лазера с распределенной обратной связью и генератора пилообразных импульсов, которые подаются на изгибающуюся пьезопластину. Поэтому, для данного спектрофотометра перед началом работы требуется предварительная настройка.

Для устранения указанного недостатка на рисунке 5 представлен спектрофотометр с синхронизацией работы РОС-лазера и генератора пилообразных импульсов.

Предлагаемый спектрофотометр содержит источник накачки, в качестве которого используется твердотельный лазер 1, светоделительное зеркало 2, цилиндрическую линзу 3, сферическую линзу 4, вращающееся зеркало 5, закрепленное на изгибающейся пьезопластине 6, фотоэлемент 7, призму 8, на которую укреплена активная среда 9 и нанесено металлическое покрытие 10, отражательные зеркала 11, 11 1 , кюветы 12, 12 1 с исследуемым и эталонными растворами, конденсоры 13, 13 1 , поляризационные ослабители 14, 14 1 , связанные с поворотным устройством 15, фотоэлементы 16, 16 1 , двухканальный усилитель 17, трехканальный аналого-цифровой преобразователь 18, компьютер 19, цифроаналоговый преобразователь 20, генератор пилообразных импульсов 21, электронный ключ 22. Элементы 2-6 и 8-10 составляют лазер с распределенной обратной связью.

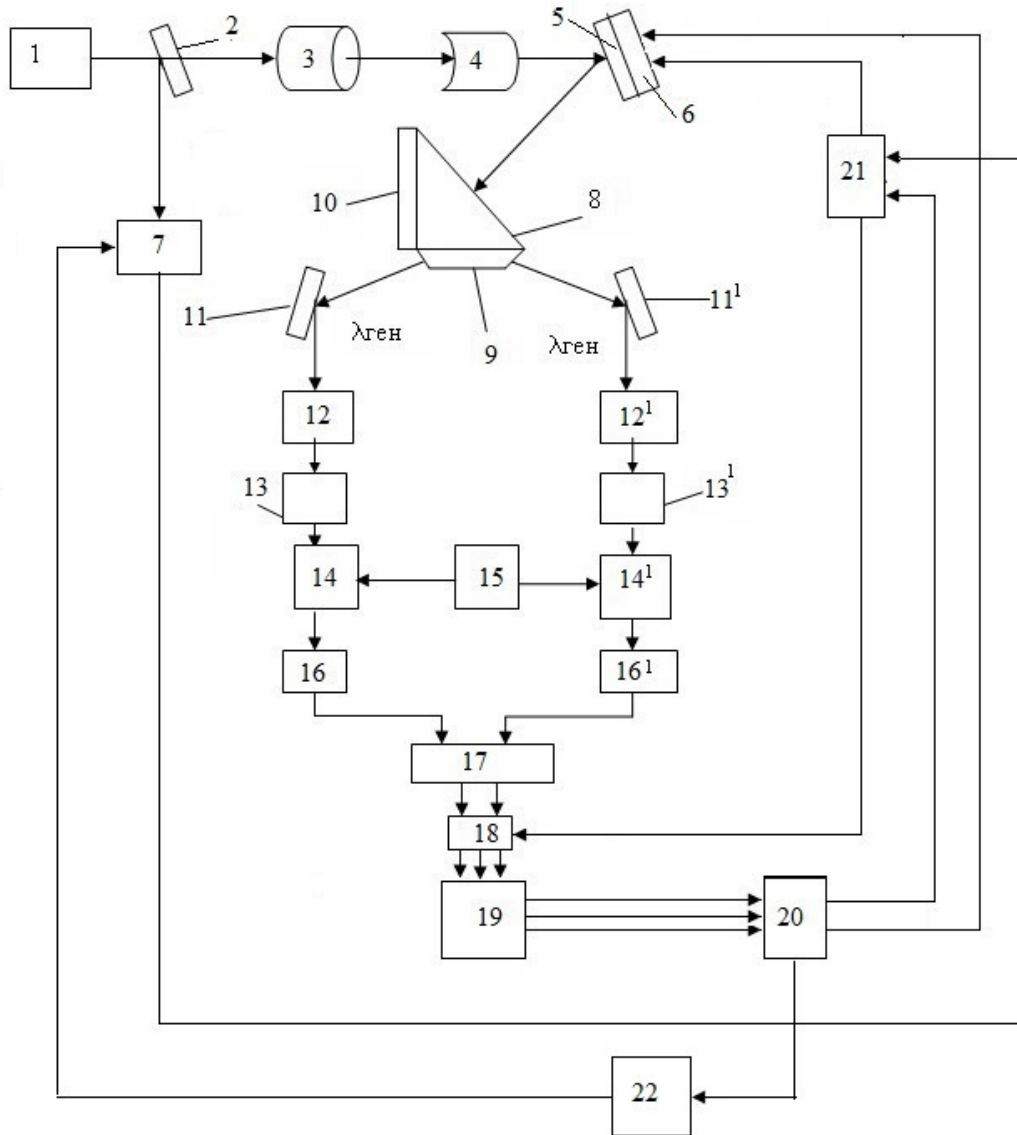


Рисунок 5 – Спектрофотометр с синхронизацией работы РОС-лазера и генератора пилообразных импульсов

Предложенный спектрофотометр работает следующим образом. Излучение от источника накачки в виде твердотельного лазера 1, сформированное в полосу цилиндрической линзой 3 и сферической линзой 4, с помощью вращающегося зеркала 5, сводится на активную среду 9 через гипотенузную грань призмы 8. Призму 8 следует выполнять из того же материала, что и активную среду 9, но без красителя. Тогда длина волны генерации лазера с распределенной обратной связью не будет зависеть от температуры.

Призма 8 имеет на катете металлическое покрытие 10, которое необходимо во избежание нарушения полного внутреннего отражения на катетной грани. Часть излучения накачки проникает в активную среду 9 непосредственно, другая часть – после отражения от металлического покрытия 10.

Интерферируя внутри активной среды 9, пучки накачки создают условия для возникновения генерации. Изменение длины волны генерации лазера с распределенной обратной связью внутри диапазона осуществляется за счет поворота вращающегося зеркала 5, которое укреплено на изгибающейся пьезопластине 6, и определяется выражением

$$\lambda_{\text{ген}} = \lambda_{\text{нак}} / \sin \Theta, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{нак}}$ – длина волны лазера накачки; Θ – угол падения излучения.

Поворот вращающегося зеркала 5 лазера с распределенной обратной связью осуществляется за счет изгиба пьезопластины 6, который возникает при подаче на нее напряжения от генератора пилообразных импульсов 21 или от компьютера 19 через цифроаналоговый преобразователь 20.

Диапазон генерации лазера с распределенной обратной связью определяется типом красителя в активной среде 9. Для его изменения заменяют генерирующие молекулы красителя. Для уменьшения потерь на отражение света от гипотенузной грани призмы 8, угол между гипотенузной и катетной гранями призмы 8, к которой примыкает активная среда 9, должен соответствовать средней длине волны диапазона перестройки данного красителя.

Изменение угла падения излучения накачки осуществляется за счет поворота вращающегося зеркала 5, которое укреплено на изгибающейся пьезопластине 6, в пределах от Θ_{\min} до Θ_{\max} .

Для синхронизации работы генератора пилообразных импульсов и лазера с распределенной обратной связью установлено светоделительное зеркало 2, которое отражает часть излучения накачки от твердотельного лазера 1 и подает его на фотоэлемент 7. При освещении фотоэлемента 7 напряжение с него подается на ключ генератора пилообразных импульсов 21 и открывает его. При открытии ключа генератор пилообразных импульсов 21 срабатывает. При отсутствии освещения фотоэлемента 7, ключ генератора пилообразных импульсов 21 закрыт и он не вырабатывает импульсы.

Лазер с распределенной обратной связью генерирует два равных световых потока (правый и левый) с длиной волны генерации $\lambda_{\text{ген}}$, которые падают на отражательные зеркала 11, 11¹, а далее на кюветы 12, 12¹ с исследуемым и эталонным растворами. После выхода из кювет 12, 12¹ световые потоки падают на конденсоры 13, 13¹. Для осуществления возможности регулирования световых потоков, падающих на фотоэлементы 16, 16¹, предусмотрены поляризационные ослабители 14, 14¹, которые связаны с поворотным устройством 15. Регулировка осуществляется путем их вращения вокруг собственной оси с помощью поворотного устройства 15. Применение поляризационных ослабителей 14, 14¹ позволяет работать с образцами, имеющими большую и малую оптическую плотность. Для повышения чувствительности фотоэлементы 16, 16¹ подключены к двухканальному усилителю 17, на выходе которого находится трехканальный аналого-цифровой преобразователь 18, который преобразует аналоговый сигнал с выхода усилителя в цифровой код. Трехканальный аналого-цифровой преобразователь 18 связан с компьютером 19, который производит обработку результатов измерений по определенной программе и выводит результаты вычислений на монитор. Необходимую длину волны генерации лазера устанавливают при помощи компьютера 19, с которого через цифроаналоговый преобразователь 20 на пьезопластину 6 подается необходимое напряжение. В результате чего она изгибается и закрепленное на ней зеркало 5 поворачивается на требуемый угол. При необходимости быстрого исследования пробы во всем диапазоне генерации длин волн лазера при помощи компьютера 19 включают генератор пилообразных импульсов 21. С генератора пилообразных импульсов 21 подается напряжение на пьезопластину 6 и одновременно через аналого-цифровой преобразователь 18 на компьютер. Под действием напряжения генератора пилообразных импульсов 21 пьезопластина 6 изгибается и зеркало 5 поворачивается за один импульс так, что длина волны генерации лазера изменяется во всем диапазоне. Фотоэлементы 16, 16¹ при этом фиксируют изменение интенсивности излучения, прошедшего через кюветы 12, 12¹, результаты измерений, усиленные двухканальным усилителем 17 подаются на компьютер 19 через аналого-цифровой преобразователь 18. Таким образом, на компьютер 19 поступает информация об изменении интенсивности излучения лазера, прошедшего через кюветы 12, 12¹ в зависимости от длины волны генерации, что позволит быстро определить минимумы и максимумы поглощения пробы внутри диапазона генерации лазера с распределенной обратной связью. В случае необходимости работы на фиксированной длине волны генерации лазера с распределенной обратной связью, ее значение устанавливается на компьютере, и далее, через цифроаналоговый преобразователь 20 в виде напряжения она передается на изгибающуюся пьезопластину 6, которая поворачивает вращающееся зеркало 5 на требуемый угол. Одновременно, с компьютера 19, через цифроаналоговый преобразователь 20 подается сигнал на электронный ключ 22, который выключает фотоэлемент 7.

При изготовлении РОС-лазера из эпоксиполимера в виде моноблока, активированного органическими красителями родамином Ж, родамином С или оксазином 17, и при накачке от лазера ИАГ:Nd³⁺, предложенный спектрофотометр сможет измерять оптическую плотность

до значения не менее «4», уширение линии генерации составит значение 0,04 нм. При применении миниатюрных лазеров накачки, например, лазера Sprout [7] общие габариты устройства будут весьма компактны.

Применение изгибающейся пьезопластины, с укрепленным на ней поворотным зеркалом, лазера с распределенной обратной связью, цифроаналогового преобразователя, компьютера и генератора пилообразных импульсов позволит быстро определить минимумы и максимумы поглощения пробы внутри диапазона генерации лазера. Применение светоделительного зеркала, фотоэлемента и электронного ключа позволит синхронизировать во времени работу генератора пилообразных импульсов и лазера с распределенной обратной связью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деулин, Б.И. Фотоэлектрокolorиметр-нефелометр с источником света в виде твердотельного РОС-лазера на красителях // Матер. VII междунар. науч.-практ. семинара «Ресурсосберегающие технологии при хранении и переработке сельскохозяйственной продукции». – Орел: Изд-во ОрелГАУ. – 2004. – С. 51-55.
2. ОКБ «Спектр». Спектральные приборы для вашей лаборатории. – Режим доступа: <http://www.okb-spectr.ru/>
3. Сигма Lab. Лабораторное оборудование и аналитическое оборудование. – Режим доступа: <http://www.sigma-lab.ru/>
4. Деулин, Б.И. Модернизация твердотельного лазера на органических красителях ЛКИ-301 //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 5 (301). – 2013. – С. 145-149.
5. Патент РФ №38934 на полезную модель. Спектрофотометр / Б.И. Деулин. – Бюл. № 19 от 10.07.2004 .
6. Патент РФ № 134639 на полезную модель. Спектрофотометр/ Б.И. Деулин. – Бюл. №32 от 20.11.2013.
7. Lighthouse Photonics. – Режим доступа: <http://www.lighthousephotonics.com/>

Деулин Борис Иванович

Орловский государственный аграрный университет, г. Орел
Старший преподаватель кафедры «Теплотехника и электротехника»
E-mail: lobo10@rambler.ru

B.I. DEULIN

AUTOMATED SPECTROPHOTOMETER WITH A LASER LIGHT SOURCE

Problem of creating a spectrophotometer capable of measuring samples with high optical density and the automation of the measurement has been widely discussed. This paper presents a spectrophotometer and a light source in the form of the DFB laser based on organic dyes having the ability to measure in automatic mode.

Keywords: *spectrophotometer, DFB laser, organic dyes, piezoceramic plates, pumping.*

BIBLIOGRAPHY

1. Deulin, B.I. Fotojelektrokolorimetr-nefelometr s istochnikom sveta v vide tverdotel'nogo ROS-lazera na krasitel'jah // Mater. VII mezhdunar. nauch.-prakt. seminaru «Resursosberegajushhie tehnologii pri hranenii i pererabotke sel'skhozjajstvennoj produkcii». – Орел: Изд-во ОрелГАУ. – 2004. – С. 51-55.
2. ОКБ «Спектр». Спектральные приборы для вашей лаборатории. – Режим доступа: <http://www.okb-spectr.ru/>
3. Sigma Lab. Laboratornoe oborudovanie i analiticheskoe oborudovanie. – Режим доступа: <http://www.sigma-lab.ru/>
4. Deulin, B.I. Modernizacija tverdotel'nogo lazera na organicheskikh krasitel'jah LKI-301 //Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - № 5 (301). – 2013. – С. 145-149.
5. Patent RF №38934 na poleznuju model'. Spektrofotometr / B.I. Deulin. – Bjul. № 19 ot 10.07.2004 .
6. Patent RF № 134639 na poleznuju model'. Spektrofotometr/ B.I. Deulin. – Bjul. №32 ot 20.11.2013.
7. Lighthouse Photonics. – Режим доступа: <http://www.lighthousephotonics.com/>

Deulin Boris Ivanovich

Orel State Agrarian University, Orel
Senior lecturer in "Heat and Electrical Engineering"
E-mail: lobo10@rambler.ru

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 681.518.2

В.А. КРИВОНОСОВ, В.А. БАБЕНКОВ

НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Рассмотрены проблемы контроля текущего состояния химико-технологических процессов (ХТП), измерение выходов которых выполняется в дискретные моменты времени. Представлена структура непрерывно-дискретного наблюдателя, позволяющего непрерывно оценивать значения координат состояния динамической системы, а также низкочастотные тренды входных возмущений. Разработан наблюдатель для одного из основных каналов управления процесса производства экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК). Приведены результаты моделирования работы построенного наблюдателя для основных координат состояния ХТП, в число которых включено характерное для процесса экстракции возмущающее воздействие.

Ключевые слова: химико-технологический процесс; координаты состояния; непрерывно-дискретный наблюдатель состояния; оценка тренда возмущения.

Введение

Контроль многих непрерывных химико-технологических процессов (ХТП) включает измерение расходов реагентов, уровней, температур, давлений, а также периодический лабораторный анализ проб, отобранных в контрольных точках технологических агрегатов. Интервалы времени между отборами проб зачастую настолько велики, что не позволяют своевременно отреагировать на отклонение основных характеристик технологического процесса от оптимальных значений. Оценка текущего состояния ХТП осложняется возмущениями по составу сырья, появлением систематических погрешностей в показаниях некоторых расходомеров, а также значительной инерционностью объекта, наличием запаздывания в реакции выходов на изменение управляющих и возмущающих воздействий. Поэтому повышение точности и оперативности контроля состояния таких объектов по результатам приборных измерений и данным лабораторного анализа является весьма актуальной задачей.

Одним из наиболее эффективных средств оценки состояния динамических систем являются так называемые наблюдатели состояния, непрерывные и дискретные варианты которых рассмотрены в [1, 2]. В [3] разработан наблюдатель, оценивающий не только координаты состояния, но и возмущения.

В данной статье рассматривается непрерывно-дискретный наблюдатель, позволяющий непрерывно оценивать вектор состояния ХТП, а также низкочастотный тренд возмущающих воздействий. Входы объекта измеряются непрерывно, а выходы только в дискретные моменты времени, при этом период дискретности может быть достаточно большим и определяется периодичностью лабораторного анализа.

Постановка задачи

Пусть стационарный динамический объект управления описывается в пространстве состояний системой уравнений

$$\begin{cases} X'(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t) + D \cdot F(t); \\ Y(t) = C \cdot X(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $X(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$ – вектор координат состояния; $U(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t))^T$ – вектор управляющих воздействий; $F(t) = (f_1(t), f_2(t), \dots, f_p(t))^T$ – вектор возмущающих воздействий; $Y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t))^T$ – вектор измеряемых выходных сигналов;

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} - \text{матрица состояния}; \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1r} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & \dots & b_{nr} \end{bmatrix} - \text{матрица управления};$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1p} \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & \dots & d_{np} \end{bmatrix} - \text{матрица возмущения}; \quad C = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & \dots & c_{mn} \end{bmatrix} - \text{матрица выхода объекта}.$$

Необходимо разработать наблюдатель, непрерывно оценивающий текущие значения вектора координат состояния $X(t)$ и низкочастотные тренды вектора возмущения $F(t)$ по непрерывным измерениям управляющих воздействий $U(t)$ и данным контроля выхода $Y(t)$, полученным в дискретные моменты времени.

Разработка непрерывно-дискретного наблюдателя

Учитывая, что выше поставлена задача восстановления не только координат состояния $X(t)$, но и возмущений $F(t)$, включим составляющие $F(t)$ в вектор $\hat{X}(t)$ оцениваемых наблюдателем координат

$$\hat{X}(t) = (\hat{x}_1(t), \dots, \hat{x}_n(t), \hat{f}_1(t), \dots, \hat{f}_p(t))^T.$$

Символом " $\hat{}$ " обозначены оценки соответствующих сигналов. Заметим, что с точки зрения частотных характеристик, ХТП, как правило, представляют собой фильтры низкой частоты. Поэтому высокочастотные составляющие возмущения $F(t)$ хорошо подавляются инерционными объектами и не оказывают существенного влияния на состояние ХТП. Для задач контроля и управления основной интерес представляют низкочастотные возмущения. С целью определения именно таких трендов возмущений в модели наблюдателя будем полагать, что скорости изменения всех оцениваемых $f_i(t)$ равны нулю

$$\frac{d\hat{f}_i(t)}{dt} = 0 \quad \forall i = \overline{1, p}. \tag{2}$$

Уравнения непрерывного наблюдателя в матричной форме имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \hat{X}'(t) = A_H \cdot \hat{X}(t) + B_H \cdot U(t) + K \cdot \Delta Y(t); \\ \hat{Y}(t) = C_H \cdot \hat{X}(t), \end{cases} \tag{3}$$

где $A_H = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} & d_{11} & \dots & d_{1p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} & d_{n1} & \dots & d_{np} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$ - $(n+p) \times (n+p)$ матрица состояния наблюдателя;

$$B_H = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1r} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & \dots & b_{nr} \\ 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$
 - $(n+p) \times r$ матрица управления; $K = \begin{bmatrix} k_{11} & \dots & k_{1m} \\ \dots & \dots & \dots \\ k_{(n+p)1} & \dots & k_{(n+p)m} \end{bmatrix}$ -

$(n+p) \times m$ матрица коррекции; $\Delta Y(t) = Y(t) - \hat{Y}(t)$ - вектор рассогласования между выходом объекта $Y(t)$ и оценкой $\hat{Y}(t)$ этого выхода наблюдателем;

$$C_H = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & \dots & c_{mn} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} - m \times (n+p) \text{ матрица выхода наблюдателя.}$$

Работа традиционного непрерывного наблюдателя заключается в формировании оценки координат состояния процесса по математической модели и коррекции получаемых величин с использованием рассогласования $\Delta Y(t)$ между выходами объекта и наблюдателя. Вектор $\Delta Y(t)$ в непрерывном наблюдателе определен в каждый момент времени, что позволяет постоянно корректировать оценки координат состояния по результатам измерения выхода $Y(t)$. При этом матрица K выбирается так, чтобы все корни s_i ($i = 1, n + p$) характеристического уравнения наблюдателя

$$\det[S \cdot I - (A_H - K \cdot C_H)] = 0, \tag{4}$$

где \det – символ определителя, $I - (n+p) \times (n+p)$ единичная матрица, лежали в левой полуплоскости комплексной плоскости.

Однако в ситуации, когда измерение выходов объекта производится с периодом дискретности T_H , вектор $\Delta Y(t)$ известен только в моменты измерения. Поэтому коррекцию движения наблюдателя будем осуществлять именно в эти моменты, используя короткие корректирующие импульсы $\lambda \cdot \Delta Y(t)$, длительность τ которых значительно меньше T_H :

$$\Delta Y(t) = \begin{cases} Y(t) - \hat{Y}(t) & \text{при } j \cdot T_H \leq t \leq j \cdot T_H + \tau, (j = 0, 1, 2, \dots); \\ 0 & \text{при } j \cdot T_H + \tau < t < (j + 1) \cdot T_H, (j = 0, 1, 2, \dots). \end{cases} \tag{5}$$

Коэффициент λ усиления импульсов коррекции выбирается так, чтобы обеспечить устойчивость и необходимую скорость процесса наблюдения.

Такой подход позволяет рассматривать наблюдатель как амплитудно-импульсную систему, непрерывная часть которой описывается моделью (3), а импульсный элемент (ИЭ) в канале коррекции формирует короткие прямоугольные импульсы длительностью $\tau \ll T_H$. Схема непрерывно-дискретного наблюдателя приведена на рисунке 1.

Непрерывные оценки координат состояния в таком наблюдателе на интервалах времени между импульсами формируются на основе измеряемого управления $U(t)$ и математической модели объекта. В моменты поступления данных лабораторного анализа срабатывает канал коррекции, изменяющий оценки наблюдателя с целью приближения их к истинным значениям соответствующих координат объекта. Необходимо отметить, что строгое постоянство периода T_H не требуется. Разрабатываемая процедура наблюдения сохраняется и в том случае, если какие-то пробы на анализ отобраны несколько раньше или позже установленного регламентом времени.

Непрерывная матричная передаточная функция разомкнутой части наблюдателя по каналу $\Delta Y \rightarrow \hat{Y}$ определяется следующим образом [4]:

$$W_{\Delta Y, \hat{Y}}(S) = \lambda \cdot C_H [S \cdot I - A_H]^{-1} K, \tag{6}$$

где I – единичная $(n+p) \times (n+p)$ матрица.

Дискретная передаточная функция $W_{PA3}(Z)$ разомкнутой части с учетом импульсного элемента может быть получена в результате Z – преобразования $W_{\Delta Y, \hat{Y}}(S)$

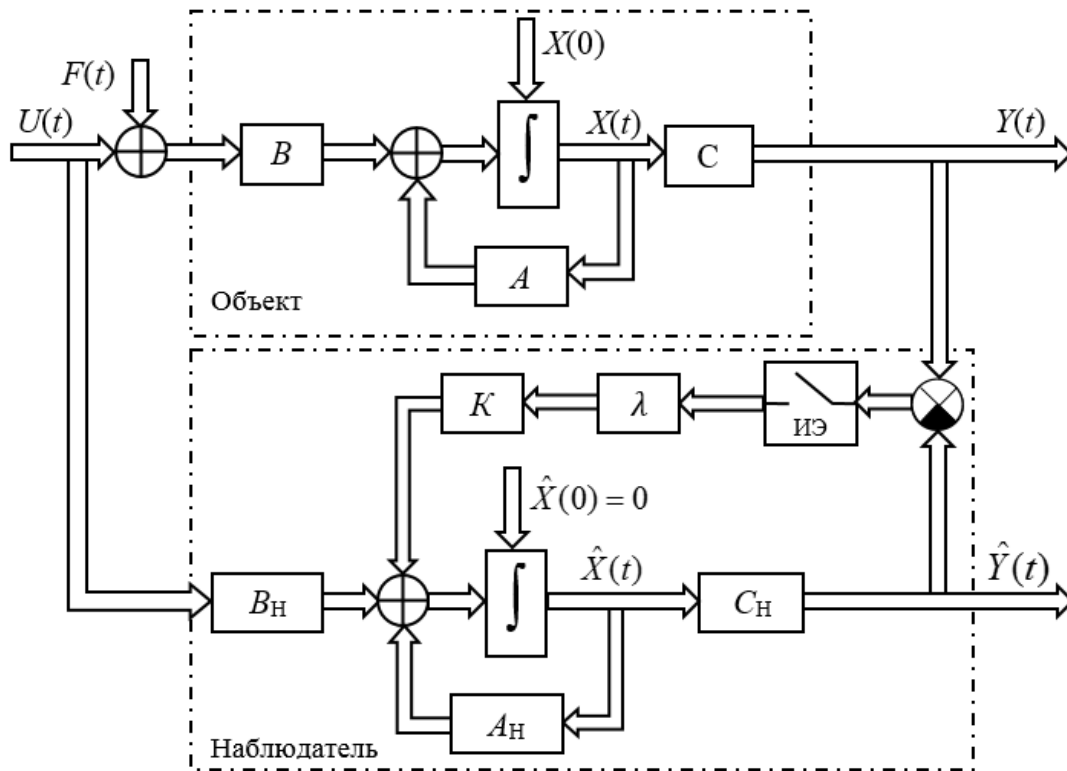


Рисунок 1 – Структурная схема непрерывно-дискретного наблюдателя состояния

$$W_{\text{ПАЗ}}(Z) = \frac{\tau}{T_{\text{И}}} \cdot Z \left\{ W_{\Delta Y, \hat{Y}}(S) \right\}. \quad (7)$$

Для обеспечения устойчивости наблюдателя коэффициенты k_{ij} матрицы коррекции K должны быть выбраны так, чтобы все корни характеристического уравнения замкнутой системы лежали в круге единичного радиуса. Выбор коэффициентов коррекции определяет скорость и характер переходных процессов в наблюдателе. При этом необходимо учитывать, что набор коэффициентов k_{ij} , обеспечивающий большее быстродействие наблюдателя, как правило, повышает его чувствительность к неизбежным погрешностям измерения выхода $Y(t)$.

Пример построения наблюдателя

Производство экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) в отделениях ЭФК 3,4 ООО «Балаковские минеральные удобрения» относится к рассмотренной выше категории ХТП. Процесс разложения апатитового концентрата серной кислотой с переходом фосфорного ангидрида (P_2O_5) в жидкую фазу образующейся пульпы осуществляется в экстракторе, состоящем из двух цилиндрических реакторов, соединенных свободным перетоком.

Эффективность процесса экстракции существенно зависит от концентрационного состава пульпы. Отбор проб пульпы для лабораторного анализа осуществляется 1 раз в 2 часа в первом реакторе. Одной из важнейших характеристик состава пульпы, влияющих на степень извлечения P_2O_5 из сырья, является концентрация серного ангидрида (SO_3) в жидкой фазе. Нелинейная динамическая математическая модель этого ХТП приведена в [5]. Структурная схема линеаризованной модели канала формирования концентрации SO_3 в первом и втором реакторах экстрактора в отклонениях Δ от соответствующих значений номинального режима приведена на рисунке 2.

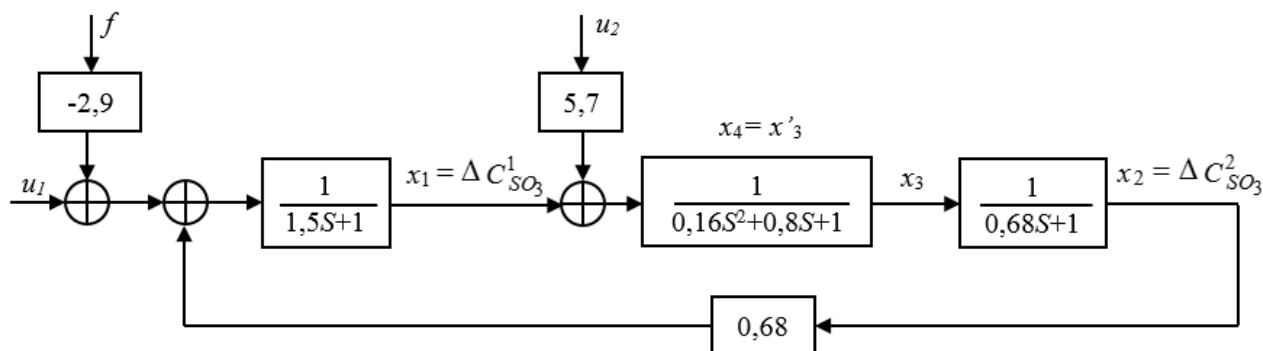


Рисунок 2 - Структурная схема линейризованной модели канала формирования SO_3

$\Delta C^1_{SO_3}$, $\Delta C^2_{SO_3}$ – концентрации SO_3 в жидкой фазе пульпы 1-го и 2-го реактора;

$u_1 = 5,6\Delta G^1_{H_2SO_4} - 2,9\Delta G_{АП}$ – управляющее воздействие в первый реактор;

$u_2 = \Delta G^2_{H_2SO_4}$ – управляющее воздействие во второй реактор;

f – эквивалентное возмущение по каналу расхода апатита

Управляющее воздействие u_1 в первый реактор экстрактора представляет собой линейную комбинацию отклонений расходов серной кислоты ($\Delta G^1_{H_2SO_4}$) и апатита ($\Delta G_{АП}$) в этот реактор. Во второй реактор подается дополнительное количество серной кислоты, отклонение расхода которой ($\Delta G^2_{H_2SO_4}$) от номинального значения является управляющим воздействием u_2 . Постоянные времени динамических звеньев структурной схемы приведены в часах. Управляющие воздействия u_1 и u_2 измеряются непрерывно, а значение $\Delta C^1_{SO_3}$ определяется периодически, $T_{И} = 2$ час.

Модель системы, приведенной на рисунке 2, в пространстве состояний имеет вид:

$$\begin{cases} x'_1 = -0,67x_1 + 0,45x_2 + 0,67u_1 - 1,93f; \\ x'_2 = -1,47x_2 + 1,47x_3; \\ x'_3 = x_4; \\ x'_4 = -6,25x_3 - 5x_4 + 6,25x_1 + 35,63u_2. \end{cases} \quad (8)$$

$$y = x_1.$$

В число координат состояния наблюдателя включена дополнительная координата $x_5 = \hat{f}$, представляющая собой оценку низкочастотного тренда возмущения f . Тогда модель наблюдателя описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \hat{x}'_1 = -0,67\hat{x}_1 + 0,45\hat{x}_2 - 1,93\hat{x}_5 + 0,67u_1 + k_1\Delta y; \\ \hat{x}'_2 = -1,47\hat{x}_2 + 1,47\hat{x}_3 + k_2\Delta y; \\ \hat{x}'_3 = \hat{x}_4 + k_3\Delta y; \\ \hat{x}'_4 = -6,25\hat{x}_3 - 5\hat{x}_4 + 6,25\hat{x}_1 + 35,63u_2 + k_4\Delta y; \\ \hat{x}'_5 = k_5\Delta y. \end{cases} \quad (9)$$

$$\hat{y} = \hat{x}_1.$$

Матрицы наблюдателя соответственно имеют вид:

$$A_H = \begin{bmatrix} -0,67 & 0,45 & 0 & 0 & -1,93 \\ 0 & -1,47 & 1,47 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 6,25 & 0 & -6,25 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_H = \begin{bmatrix} 0,67 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C_H = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; \quad K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \end{bmatrix}.$$

Характеристическое уравнение для наблюдателя с непрерывным измерением рассогласования $\Delta y(t)$ имеет вид

$$\det[S \cdot I - (A_H - K \cdot C_H)] = 0, \quad \det - \text{символ определителя матрицы.} \quad (10)$$

Подставляя в (10) A_H , K и C_H , получим

$$S^5 + (7,17 + k_1)S^4 + (17,9 + 6,47k_1 + 0,45k_2 - 1,93k_5)S^3 + (18,3 + 13,6k_1 + 2,27k_2 + 0,67k_3 - 12,45k_5)S^2 + (1,95 + 9,19k_1 + 2,84k_2 + 3,35k_3 + 0,67k_4 - 26,3k_5)S - 17,8k_5 = 0. \quad (11)$$

Выберем коэффициенты коррекции k_i так, чтобы все корни уравнения (10) $s_i = -2$.

Тогда характеристическое уравнение (11) принимает вид

$$(S + 2)^5 = S^5 + 10S^4 + 40S^3 + 80S^2 + 80S + 32 = 0. \quad (12)$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях S в (11) и (12), получим

$$k_1 = 2,83; \quad k_2 = 0,71; \quad k_3 = -1,17; \quad k_4 = 9,94; \quad k_5 = -1,798.$$

Передаточная функция разомкнутой части наблюдателя по каналу $\Delta y \rightarrow \hat{y}$ определяется выражением (6) и при выбранных коэффициентах коррекции k_i имеет вид

$$W_{\Delta y, \hat{y}}(S) = \lambda \cdot \frac{2,83S^4 + 22,1S^3 + 61,7S^2 + 78,05S + 32}{S^5 + 7,17S^4 + 17,9S^3 + 18,3S^2 + 1,95S}.$$

Пусть длительность импульса коррекции $\tau = 0,02$ часа. Тогда в соответствии с (7) при $T_H = 2$ часа дискретная передаточная функция разомкнутой части наблюдателя

$$W_{PA3}(Z) = 0,01\lambda \cdot \frac{2,83Z^4 + 0,7097Z^3 + 0,1163Z^2 + 0,00104Z - 0,000103}{Z^4 - 1,743Z^3 + 0,7092Z^2 + 0,03303Z + 0,000634}.$$

Выбрав $\lambda = 100$, после замыкания обратной связи получим

$$W_{3AM}(Z) = \frac{W_{PA3}(Z)}{1 + W_{PA3}(Z)} = \frac{2,83Z^4 + 0,7097Z^3 + 0,1163Z^2 + 0,00104Z - 0,000103}{3,83Z^4 - 1,0333Z^3 + 0,8255Z^2 + 0,03407Z + 0,000531}.$$

Характеристический полином $3,83Z^4 - 1,0333Z^3 + 0,8255Z^2 + 0,03407Z + 0,000531$ имеет следующие корни: $z_{1,2} = 0,155 \pm j0,451$; $z_{3,4} = -0,02 \pm j0,0145$, что говорит об устойчивости и высокой скорости переходных процессов непрерывно-дискретного наблюдателя.

Результаты моделирования работы рассмотренного наблюдателя по координатам $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_5$ приведены на рисунке 3.

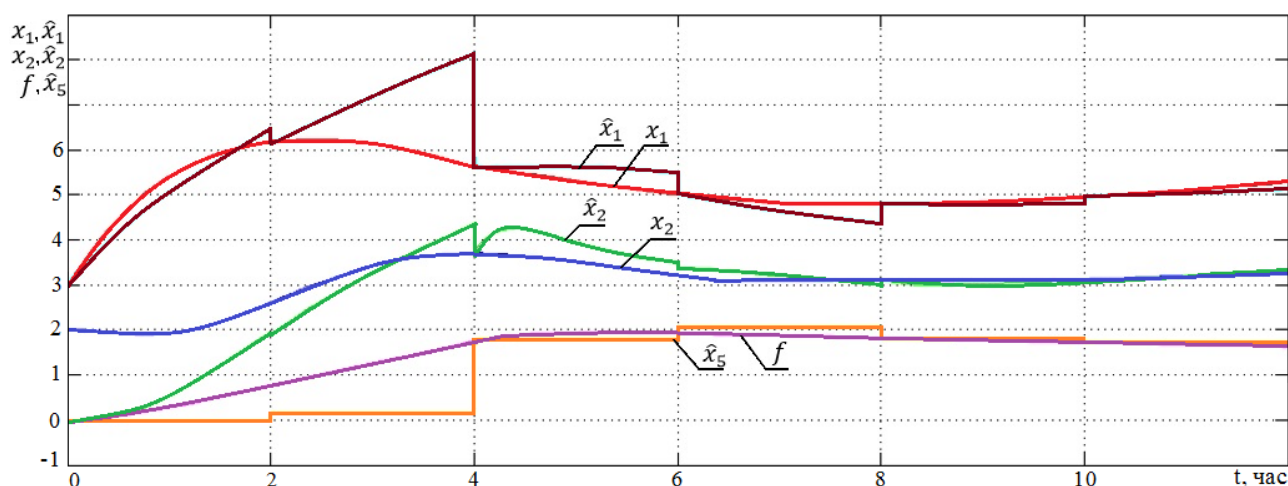


Рисунок 3 – Графики изменения координат x_1, x_2, f и их оценок $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_5$

В первые 4 часа оценки координат состояния существенно отличаются от их истинных значений. Результаты лабораторного анализа, полученные в моменты времени 2, 4, 6 часов позволили непрерывно-дискретному наблюдателю скорректировать значения оценок, которые вышли на истинные траектории оцениваемых координат. В дальнейшем небольшие отклонения оценок вызваны медленным изменением возмущения f .

Заключение

Рассмотрен наблюдатель состояния динамической системы, позволяющий осуществлять непрерывную оценку всех координат состояния и низкочастотных трендов входных возмущений по результатам непрерывного измерения входов и дискретного измерения выходов. Период $T_{и}$ дискретности измерений может быть соизмерим с постоянными времени звеньев системы, при этом не требуется строгого постоянства $T_{и}$. Такая ситуация характерна для задач контроля и управления химико-технологическими процессами, выходы которых определяются в результате лабораторного анализа. Оценки непрерывно-дискретного наблюдателя позволяют своевременно выявить отклонения от регламентного режима и скорректировать движение системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коровин, С.К. Наблюдатели состояния для линейных систем с неопределенностью /С.К. Коровин, В.В. Фомичев. - М.: Физматлит, 2007. – 224 с.
2. Коровин, С.К. Об одном подходе к построению функциональных наблюдателей для систем с запаздыванием / С.К. Коровин, А.В. Буданова, В.В. Фомичев // Доклады Академии наук. - 2011. - Т. 441. - № 1. - С. 33-37.
3. Еременко, И.Ф. Система управления с наблюдателем координат состояния и неопределенного возмущения /И.Ф. Еременко, В.А. Кривонос // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2005. - № 7. - С.10-13.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т.1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 656 с.
5. Математическая модель процесса экстракции и фильтрации производства фосфорной кислоты ООО «Балаковские минеральные удобрения» / В.А. Кривонос, В.А. Бабенков, В.В. Соколов, Е.Ю. Шибанов, В.П. Перекрестов // Автоматизация в промышленности, 2013. №7, С. 24-29

Кривонос Владимир Алексеевич

СТИ НИТУ «МИСиС» им. А.А.Угарова, г. Старый Оскол

Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных и информационных систем управления

309516, Белгородская область, г. Старый Оскол, микрорайон Макаренко, д. 42

Тел: 8(910)3688150

E-mail: krivonosov_v_a@mail.ru

Бабенков Владимир Александрович

СТИ НИТУ «МИСиС» им. А.А. Угарова, г. Старый Оскол

Аспирант кафедры автоматизированных и информационных систем управления

309516, Белгородская область, г. Старый Оскол, микрорайон Макаренко, д. 42

Тел: 8(951)7624474

E-mail: bva211@yandex.ru

V.A. KRIVONOSOV, V.A. BABENKOV

CONTINUOUS AND DISCRETE STATE OBSERVER OF CHEMICO-TECHNOLOGICAL PROCESS

Control problems of current state of the chemico-technological processes (CTP) are considered. The process output signals are measured in discrete time points. The structure of the continuous and discrete observer which admits to evaluate constantly the values of state coordinates of dynamic system as well as low-frequency trends of disturbance is presented. The observer is designed for one of the main control channel of production process of the phosphoric acid extraction (PAE). The results of work model of the constructed observer for the main state coordinates of CTP are given. The results include disturbance influence which is specific for extraction process.

Keywords: chemical and technological process; state coordinates; continuous and discrete state observer; valuation of a trend of disturbance.

BIBLIOGRAPHY

1. Korovin, S.K. Nabljudateli sostojanija dlja linejnyh sistem s neopredelennost'ju /S.K. Korovin, V.V. Fomichev. - M.: Fizmatlit, 2007. – 224 s.
2. Korovin, S.K. Ob odnom podhode k postroeniju funkcional'nyh nabljudatelej dlja sistem s zapaz-dyvaniem / S.K. Korovin, A.V. Budanova, V.V. Fomichev // Doklady Akademii nauk. - 2011. - T. 441. - № 1. - S. 33-37.
3. Eremenko, I.F. Sistema upravlenija s nabljudatelem koordinat sostojanija i neopredelennogo voz-mushhenija /I.F. Eremenko, V.A. Krivonosov // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. - 2005. - № 7. - S.10-13.
4. Metody klassicheskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija. T.1: Matematicheskie modeli, dinamicheskie harakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravlenija / Pod red. K.A. Pupkova, N.D. Egupova. – M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.Je. Bauman, 2004. – 656 s.
5. Matematicheskaja model' processa jekstrakcii i fil'tracii proizvodstva fosfornoj kisloty OOO «Balakovskie mineral'nye udobrenija» / V.A. Krivonosov, V.A. Babenkov, V.V. Sokolov, E.Ju. Shibanov, V.P. Perekrestov // Avtomatizacija v promyshlennosti, 2013. №7, S. 24-29

Krivonosov Vladimir Alekseevich

Stary Oskol technological Institute named after A.A. Ugarov, branch of Federal state educational Institution of higher professional education "National research technological Univerity "Moscow Institute of Steel and Alloys", Russia
309516, Stary Oskol, , Makarenko Street, 42

PhD (Technical), Associate professor

E-mail: krivonosov_v_a@mail.ru

Babenkov Vladimir Alexandrovich

Stary Oskol technological Institute named after A.A. Ugarov, branch of Federal state educational Institution of higher professional education "National research technological Univerity "Moscow Institute of Steel and Alloys", Russia

PhD student

E-mail: bva211@yandex.ru

С.А. ПОЛЯКОВ, М.А. ВОЛКОВ

ЭКСПРЕССНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

В статье рассматривается проблема экспрессного контроля бензина, основанного на косвенном определении октанового числа бензина по емкости измерительного преобразователя. Предлагается решение задачи контроля бензина с учетом его температуры, а также выявление различных примесей по величине его электрической проводимости.

Ключевые слова: контроль бензина, диэлькометрический контроль.

Проблема контроля бензина в настоящее время является наиболее актуальной в связи с введением в России европейских экологических программ по производству автомобильных бензинов в соответствии с европейским стандартом EN 228. Однако сроки введения экологических нормативов на выбросы вредных веществ автомобилями отстают на 4-6 лет от подобных сроков в странах-производителях автомобилей. Надо заметить, что указанные сроки относятся только к новым автомобилям, вновь выпускаемым в обращение. Принятый технический регламент фактически законодательно закрепил отставание России по срокам введения европейских норм на выбросы автомобилями. Однако парк автомобилей иностранной техники постоянно растет и требует топлива, предусмотренного заводом изготовителем на момент выпуска (Евро 5).

Следовательно, длительная эксплуатация автомобильной техники на топливе, качество которого не соответствует установленным техническим регламентам по его эксплуатации, может привести к преждевременному износу двигателя, повреждению его системы питания или внезапной остановке. В этом случае возникает необходимость наличия мобильных устройств для анализа качества топлива с минимальным временем контроля.

Из существующих методов контроля качества бензина, с учетом достоинств и недостатков различных методов, следует выделить *диэлькометрические* методы, как наиболее перспективные. Проведенный аналитический обзор способов контроля бензина и методов снижения инструментальных погрешностей при диэлькометрических измерениях показал перспективность применения двухпараметрового метода резонансного контроля, реализуемого посредством цифрового измерения и обработки амплитудных и фазочастотных параметров выходных сигналов емкостных датчиков.

В результате анализа сформулирована задача контроля бензина: определить неизвестное значение диэлектрической проницаемости и удельной проводимости в рассматриваемой полосе частот при условии обеспечения минимальных погрешности и времени измерения.

Аналитическое представление постановки задачи представлено на рисунке 1.

Дано:	$\varepsilon_{\text{бенз}}, \sigma_{\text{бенз}}, T_{\text{бенз}}$	Ограничения: 1. $T_{\text{бенз}} \geq 0^{\circ}\text{C}$ 2. $\sigma_{\text{бенз}} \approx 100 \left[\frac{\text{нСм}}{\text{м}} \right]$ 3. $t_{\text{изм}} = 1...3 \text{ с}$ 4. $\delta_{\text{изм}} \leq \pm 14 \% \text{ (ГОСТ 2112-80)}$
где:	$\varepsilon_{\text{бенз}}$ - диэлектрическая проницаемость бензина	
	$\sigma_{\text{бенз}}$ - удельная проводимость бензина	
	$T_{\text{бенз}}$ - температура бензина на момент измерения	

Рисунок 1 – Постановка задачи на исследование

На основании однопараметрической модели диэлькометрического измерения [1] и с учетом задачи исследования разработана обобщенная трехпараметрическая модель процесса контроля бензина, основанная на диэлькометрическом методе контроля (рис. 2).

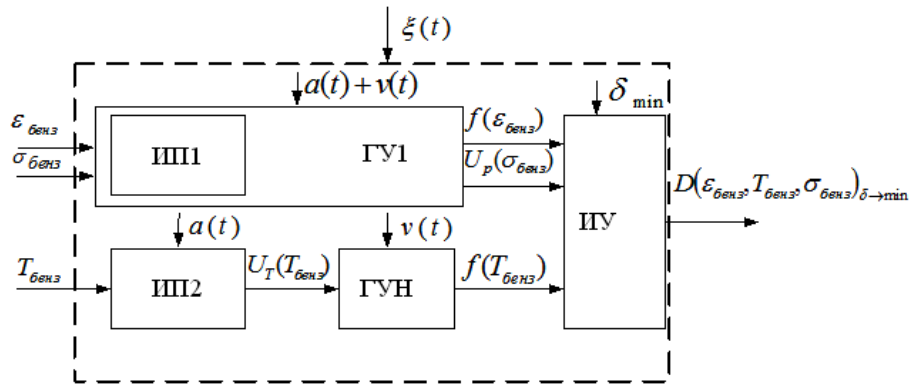


Рисунок 2 – Модель процесса экспрессного контроля бензина

Сущность модели заключается в следующем. Контролируемые параметры диэлектрической проницаемости ϵ_x , электрической проводимости σ_x и температуры T_x поступают на входы соответствующих первичных измерительных преобразователей, где преобразуются в частотно-зависимые величины $\epsilon_x(f)$ и $T_x(f)$ путем изменения резистивно-емкостных параметров измерительного двухполюсника. Генераторное устройство, работающее в стационарном режиме, реагирует на входные воздействия, поступающие на его элементы, которые вызывают пропорциональные изменения частоты выходного напряжения, измеряемые в цифровой форме. Реальные измерения происходят в условиях воздействия различных помех и шумов, которые имеют в общем случае случайный характер и ухудшают точность и стабильность измерений.

Работу генераторного устройства, содержащего транзисторный автогенератор, можно описать нелинейным стохастическим дифференциальным уравнением второго порядка [2]:

$$d^2i / dt^2 + 2\lambda di / dt + \omega_0^2 i = 0, \tag{1}$$

где $2\lambda = (R_3 C)^{-1} - MS(i)/LC$ – коэффициент демпфирования;

M – коэффициент взаимоиндукции в цепи обратной связи генератора;

R_3 – максимальное эквивалентное сопротивление контура с емкостным преобразователем на резонансной частоте.

Для стационарного режима работы генератора данное выражение имеет вид:

$$i(t) = i_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \tag{2}$$

При этом флуктуации амплитуды и фазы, обусловленные случайным шумом, описываются выражениями:

$$a(t) = \omega_0 \int_{-\infty}^t \exp[-2\lambda(t-x)] \zeta(x) \sin(\omega_0 x + \varphi_0) dx, \tag{3}$$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \frac{\omega_0}{i_0} \int_0^t \zeta(t) \cos(\omega_0 x + \varphi_0) dx. \tag{4}$$

Математическая модель измерительного преобразователя описывается выражением

$$\epsilon'_{бенз}(f) = f(\epsilon_{бенз}, \epsilon_{x1}, \epsilon_{x2}, \dots, \epsilon_{xn}). \tag{5}$$

Анализ данного выражения позволяет сделать предварительный вывод о том, что для уменьшения погрешности, вносимой первичным измерительным преобразователем, прежде всего, необходимо минимизировать числитель выражения

$$\delta_\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^n S_{y/\epsilon_{Xi}} \cdot (\Delta\epsilon_{Xi} / \epsilon_{Xi})}{S_{y/\epsilon_X} \cdot (\Delta\epsilon_X / \epsilon_X)}. \tag{6}$$

Поэтому нужно стремиться снижать чувствительность измерительного преобразователя к побочным влияющим факторам, а также принимать меры по уменьшению диапазона изменения влияющих величин.

В общем случае информацию об октановом числе несет емкость датчика, заполненного контролируемым материалом [3], которая связана с его диэлектрической проницаемостью линейным выражением:

$$C_x = \varepsilon_{\text{бенз}} \varepsilon_0 g, \quad (7)$$

где g – геометрический фактор, учитывающий конфигурацию электродов датчика;

$\varepsilon_{\text{бенз}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость топлива;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для учета зависимости емкости от температуры измеряемой среды, чувствительности преобразователя S и размера h емкостного датчика введен поправочный коэффициент:

$$K_{Tc} = K_{T\varepsilon} + 2K_{TS}S - K_{Th}. \quad (8)$$

Учет влияния различных присадок и примесей в топливе определяется выражением:

$$\varepsilon'_{\text{бенз}} = \varepsilon_{\text{осн}} + k_{\text{прис}} \varepsilon_{\text{прис}} + k_{\text{прим}} \varepsilon_{\text{прим}}. \quad (9)$$

В результате выражение для определения неизвестной емкости измерительного преобразователя примет следующий вид:

$$C_x = K_{Tc} \cdot K_{T\varepsilon} \cdot g \cdot \varepsilon'_{\text{бенз}} \cdot \varepsilon_0. \quad (10)$$

Данное выражение справедливо только для контролируемой среды или материалов без активных электрических потерь.

В реальных средах с активными потерями диэлектрическая проницаемость материала представляет собой комплексную величину:

$$C_x^* = G_x - j \left(\frac{gC\sigma}{\omega} + gC\varepsilon''_{rel}\varepsilon_0 \right), \quad (11)$$

где действительная часть является функцией октанового числа, а мнимая часть определяется общими потерями: за счет активной проводимости σ (первое слагаемое) и релаксационной составляющей потерь ε''_{rel} . При этом комплексная проводимость потерь и значение проводимости потерь G_x в этом выражении не может быть вычислено аналитическим путем.

Следовательно, для оценки проводимости контролируемого материала необходимо выполнить два измерения выходного напряжения измерительного преобразователя: с пустым емкостным датчиком $U_{\text{вых0}} = I_m R_{\text{Э0}}$ и после его заполнения контролируемым материалом $U_{\text{вых}} = I_m / (\Delta G_x + 1/R_{\text{Э0}})$, и реализовать простые арифметические операции вычитания (для выделения приращения напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$) и деления (для получения ΔG_x):

$$\Delta G_x = (U_{\text{вых0}} - U_{\text{вых}}) / U_{\text{вых}} \cdot R_{\text{Э0}} = \Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}} \cdot R_{\text{Э0}}. \quad (12)$$

Для выполнения таких операций в блоке обработки данных измерительного прибора нужно использовать микроконтроллер с небольшим объемом памяти. Полученные после расчета электропроводимости данные необходимо вводить в качестве поправки в результаты измерений, определяемой по емкости датчика C_x , вычисленной после измерения частоты резонансных колебаний.

Для определения граничных значений работы предложенной модели были проанализированы статистические данные о взаимосвязи октанового числа и диэлектрической проницаемости топлива [4] (рис. 3), которые позволили вычислить граничные значения диэлектрической проницаемости для топлива с разным октановым числом: $\varepsilon_{\text{бенз}} = \{2,08 \dots 2,295\}$.

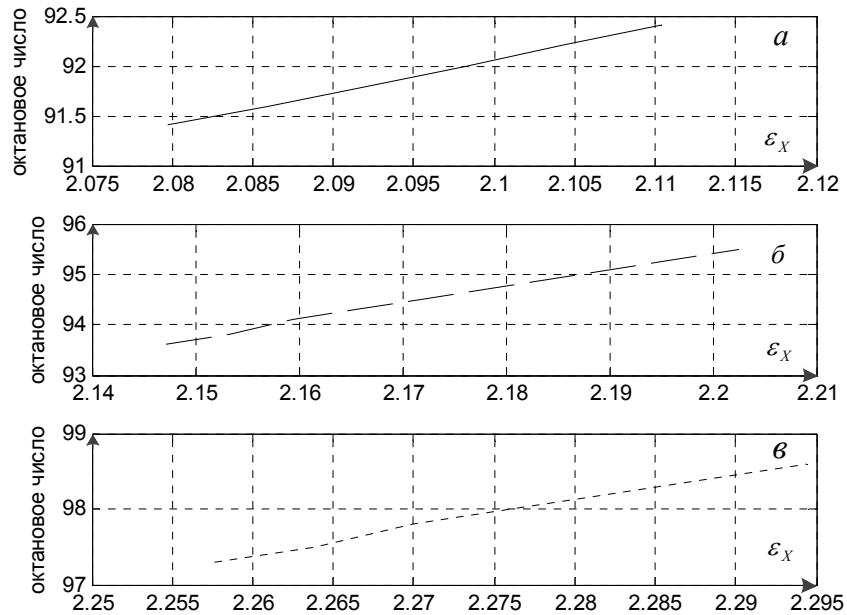


Рисунок 3 – Зависимости октанового числа от диэлектрической проницаемости
 а – для 92 бензина, б – для 95 бензина, в – для 98 бензина

Для определения граничных частот полосы измерения было проведено математическое моделирование нормированной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) емкостного датчика с учетом расчетных значений его индуктивности и емкости (рис. 4).

Анализ графиков показал, что для измерения значений октанового числа с помощью одного колебательного контура без перестройки его элементов необходимо, чтобы его АЧХ соответствовала обобщенной АЧХ контуров бензина с разным октановым числом. Исходя из полученных значений граничных частот, выполнена оценка относительной погрешности моделирования на крайних частотах полосы пропускания:

$$\delta_B = \frac{C_{ист} - C_B}{C_{ист}} \cdot 100\% = 0,29\%$$

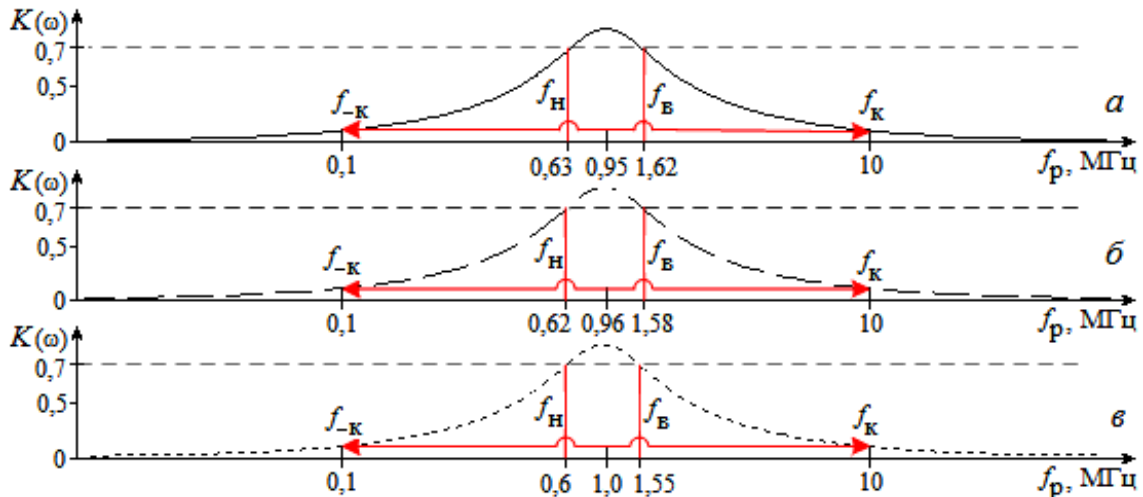


Рисунок 4 – Нормированные резонансные кривые:
 а – для 92 бензина, б – для 95 бензина, в – для 98 бензина

Согласно разработанной математической модели процесс экспрессного контроля параметров бензина сводится к оценке его диэлектрической проницаемости и коррекции данного значения с учетом температуры и активной проводимости топлива.

Функциональная схема прибора для экспрессного контроля октанового числа топлива с возможностью компенсации погрешности измерений при влияниях мешающих факторах представлена на рисунке 5 [5].

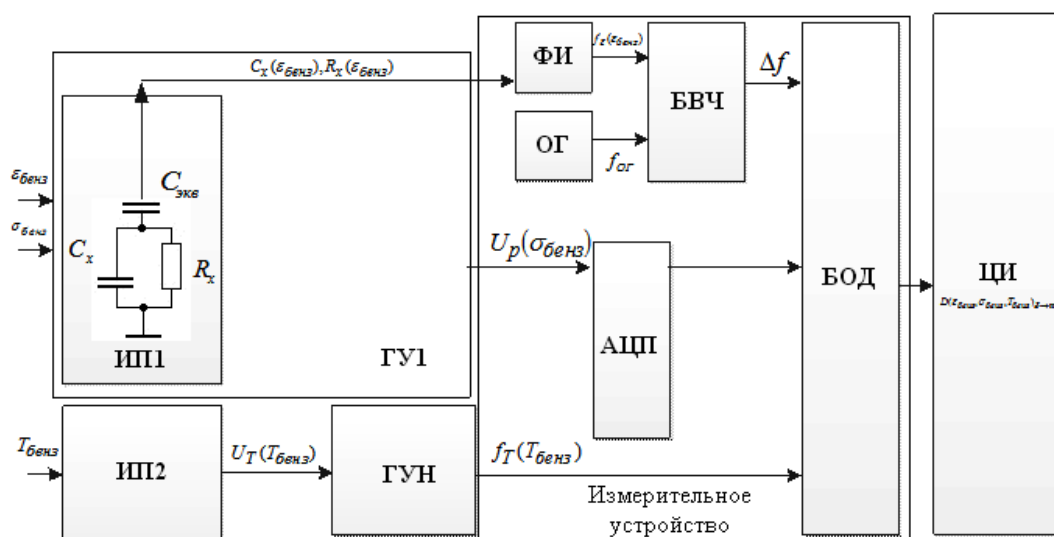


Рисунок 5 – Функциональная схема прибора экспресс-контроля бензина

Функционально измерительный преобразователь ИП1 входит в состав генераторного устройства (рис. 6) и выполнен в виде цилиндрического конденсатора, в котором функцию диэлектрика выполняет измеряемое топливо.

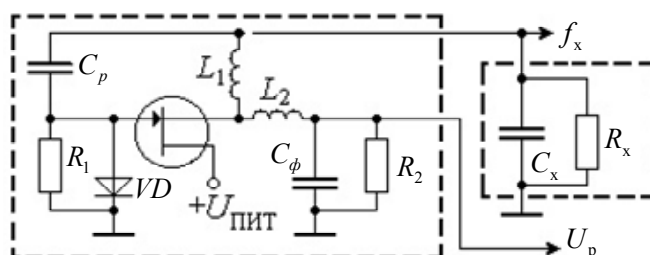


Рисунок 6 – Принципиальная схема генераторного датчика

На выходе генераторного устройства ГУ1 формируются две величины, характеризующие через функцию преобразования (12) значение активной проводимости измеряемого топлива $U_p = U_{отс} R_\phi / (R_\phi + R_x)$ и диэлектрическую проницаемость находящегося в емкостном датчике топлива, влияющего на частоту $f(\epsilon_x) = f_{\epsilon, \text{реал}}(\epsilon_x) / \sqrt{1 - (L_1 + L_2) \cdot U_p^2 / [4R_\phi^2 C_x (U_{отс} - U_p)^2]}$.

Гармоническое колебание подается на формирователь импульсов (ФИ), где происходит его преобразование в прямоугольную форму.

Полупроводниковый датчик температуры ИП2 формирует на выходе напряжение $U_T(T_x)$, пропорциональное температуре измеряемого топлива.

Генератор, управляемый напряжением (ГУН), осуществляет преобразование $U_T(T_x)$ в импульсные колебания прямоугольной формы, частота которых пропорциональна изменению температуры контролируемого топлива.

Корректировка конечного значения октанового числа осуществляется в микропроцессорном блоке обработки данных (БОД) измерительного устройства.

Исходя из разработанной функциональной схемы системы, разработан алгоритм контроля октанового числа бензина, который должен включать в себя следующие этапы (рис. 7).

Для количественной оценки полученного эффекта была проведена оценка полученных результатов методом идеальной точки [6] в соответствии с вектором показателей:

$$\vec{I}(x) = [D, \delta_{\text{общ}}, t_{\text{изм}}], \quad (13)$$

где D – диапазон измерения октанового числа, единиц;

$t_{\text{изм}}$ – время измерения;

$\delta_{\text{общ}}$ – инструментальная погрешность прибора.

Значение обобщенного показателя эффективности, т.е. выигрыш после внедрения устройства измерения октанового числа бензина, описывается следующим выражением:

$$V_{\text{эф}} = \frac{\Delta Y^{\text{баз}} - \Delta Y^{\text{нов}}}{\Delta Y^{\text{баз}}} \times 100 \%, \quad (14)$$

где $\Delta Y^{\text{баз}}$ – обобщенный показатель эффективности базового образца;
 $\Delta Y^{\text{нов}}$ – обобщенный показатель эффективности нового образца.

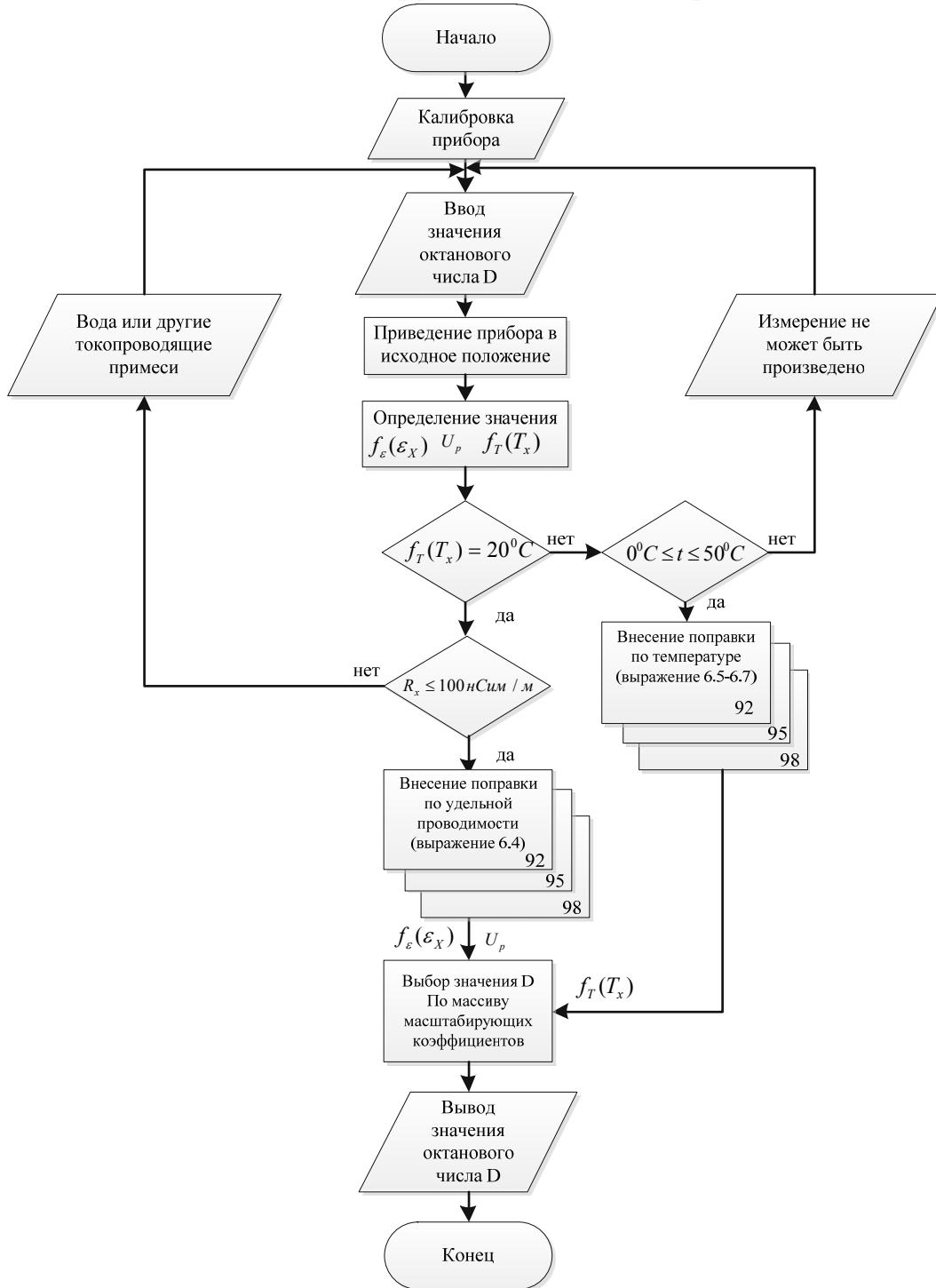


Рисунок 7 – Алгоритм экспрессного контроля бензина с автоматической коррекцией результатов измерений

В качестве базового образца использовался октанометр *SHATOX SX-100M*. Сравнительная характеристика современных октанометров представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики современных октанометров

Наименование	Диапазон измерения (ед. оч)	Относительная погрешность измерения, %	Время измерения, с	Коррекция по температуре	Коррекция по удельной проводимости
ПЭ-7300 М (ЭКОХИМ)	66 - 98	4,08	3	нет	нет
ОКТАН-ИМ	67 - 98	2,9	10	нет	нет
SHATOX SX-100M	40 - 120	2,09	5	есть	нет
Разработанный образец	40 - 120	1,1	2	есть	есть

Сравнение приведенных в этой таблице показателей показывает, что обобщенный выигрыш при суммарном значении погрешности измерения 1,1 % составляет 23,8 %.

Таким образом, получены следующие результаты:

1. Разработана модель процесса контроля бензина, обеспечивающая определение его октанового числа с компенсацией влияния внешних факторов за счет использования удельной электропроводимости среды и ее температуры при появлении частотного резонанса.

2. На основе предложенной математической модели разработан алгоритм экспрессного контроля, обеспечивающий снижение погрешности измерений параметров бензина за счет автоматического коррекции электрической проводимости и температуры среды.

3. Разработана структурная схема прибора диэлькометрического контроля топлива с малой инструментальной погрешностью измерения параметров бензина разных марок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клаассен, К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике /К.Б. Клаассен. Пер. с англ. – М.: Постмаркет. – 2000.
2. Арш, Э.С. Автогенераторные методы и средства измерений /Э.С. Арш. – М.: Машиностроение. – 1979.
3. Кричевский, Е.С. Теория и практика экспрессного контроля твердых и жидких материалов / Е.С. Кричевский, В.К. Бензарь, М.В. Венедиктов. – М.: Энергия. – 1980.
4. Скворцов, Б.В. Приборы и системы контроля качества углеводородных топлив / Б.В. Скворцов, Н.Е. Конюхов, В.Н. Астапов. – Самара: Изд. СамГТУ. – 2006.
5. Патент РФ № 2460065 на изобретение. Устройство диэлькометрического контроля бензина / С.А. Поляков, М.А. Волков, Б.Р. Иванов. 2012. – 6 с.
6. Лисичкин, В.Г. Резонансные измерения параметров окружающей среды. – Орел.: Академии ФСО России. – 2011.

Поляков Сергей Александрович

Академия ФСО России, г. Орел

Аспирант

E-mail: qwertyuiop84@inbox.ru

Волков Михаил Анатольевич

Академия ФСО России, г. Орел

Научный сотрудник

S.A. POLYAKOV, M.A.VOLKOV

THE EXPRESS MEASUREMENT OF OCTANE NUMBER VIA DIELECTROMETRIC METHOD

The problem of the express control of gasoline, based on the indirect determination of the octane number of gasoline tank transmitter. Offer a solution to the problem of control of gasoline based on its temperature, as well as identification of various impurities on the value of its electrical conductivity.

Keywords: the quality of gasoline, octane number.

BIBLIOGRAPHY

1. Klaassen, K.B. Osnovy izmerenij. Jelektronnye metody i pribory v izmeritel'noj tehnike /K.B. Klaassen. Per. s angl. – M.: Postmarket. – 2000.
2. Arsh, Je.S. Avtogeneratornye metody i sredstva izmerenij /Je.S. Arsh. – M.: Mashinostroenie. – 1979.
3. Krichevskij, E.S. Teorija i praktika jekspressnogo kontrolja tverdyh i zhidkih materialov / E.S. Krichevskij, V.K. Benzar', M.V. Venediktov. – M.: Jenergija. – 1980.
4. Skvorcov, B.V. Pribory i sistemy kontrolja kachestva uglevodorodnyh topliv / B.V. Skvorcov, N.E. Konjuhov, V.N. Astapov. – Samara: Izd. SamGTU. – 2006.
5. Patent RF № 2460065 na izobretenie. Ustrojstvo dijel'kometricheskogo kontrolja benzina / S.A. Poljakov, M.A. Volkov, B.R. Ivanov. 2012. – 6 s.
6. Lisichkin, V.G. Rezonansnye izmerenija parametrov okruzhajushhej sredy. – Orel.: Akademii FSO Rossii. – 2011.

Polyakov Sergey Alexandrovich

Academy of Federal Guard Service of Russian Federation, Orel
Trainee
E-mail: qwertyuiop84@inbox.ru

Volkov Mikhail Anatolievich

Academy of Federal Guard Service of Russian Orel
researcher

Л.А. БОНДАРЕВА, М.В. СУХАНОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛИСТЬЕВ РАСТЕНИЙ

В статье проведен анализ актуальности исследования объектов растительного мира и представлены результаты исследования поверхности листьев, позволившие провести количественную оценку свойств поверхностей объектов растительного происхождения. Предложена методика определения параметров и характеристик поверхности листьев растений, предусматривающая построение профилограмм и их дальнейшую оценку, использование которой позволило сделать вывод о наличии шероховатости на поверхности исследуемых объектов. Проведен анализ полученных экспериментально и расчетным путем параметров шероховатости листьев.

Ключевые слова: шероховатость, поверхность, волнистость, профилограмма, параметры шероховатости, листья, растения.

Одним из пяти основных чувств, позволяющим живым существам воспринимать тактильное воздействие, распознавать предметы внешней среды и оценивать их форму, размеры и свойства поверхности, является осязание. Только с помощью данного чувства возможно получение информации об окружающем мире путем непосредственного контакта с объектами, кроме того осязание позволяет заменить другие органы чувств в случае их повреждения [1]. На протяжении долгого времени тактильное чувство являлось единственной возможностью оценить особенности поверхности. Разнообразие поверхностей, разнообразие ощущений от соприкосновения с ними, отсутствие детальных классификаций в большинстве направлений человеческой деятельности и невозможность проведения точного описания всех существующих видов поверхностей привели к тому, что уровень познания человека в этом направлении остается качественным, предполагающим субъективную оценку собственных ощущений в процессе контакта с интересующим объектом.

Достижения науки и техники позволили увидеть то, что вызывает ощущения путем увеличения поверхностей, однако единственным реальным применением этого достижения до сих пор является сфера производства. Воспроизведение объекта, представленного в виде чертежа, осуществляется путем использования различных технологических процессов. Материализация объекта всегда проходит таким образом, что идеальная поверхность, размеры и форма, указанные на чертеже и соответствующие заданным номинальным размерам и номинальной форме, далеки от тех, которые получаются на практике в процессе производственной деятельности.

Общеизвестным фактом является то, что шероховатость поверхности является одной из основных геометрических характеристик качества поверхности разнообразных деталей. По определению шероховатость поверхности – это совокупность неровностей, образующих микрорельеф поверхности детали [2]. Бесспорно, важным остается и вопрос контакта шероховатых поверхностей, так как в этом случае происходит изменение профиля в зоне контакта из-за отламывания, среза и пластического сдвига вершин неровностей.

С другой стороны, определенное состояние неровностей поверхности влияет и на проявление различных физических свойств, например, с понижением шероховатости поверхностей улучшается их способность к отражению электромагнитных, ультразвуковых и световых волн, уменьшается емкость электродов [3]. Требования к шероховатости поверхности устанавливаются исходя из функционального назначения поверхности для обеспечения заданного качества изделий [4].

Развитие производственной деятельности привело к тому, что толкование термина «шероховатость» приводится только относительно поверхности детали, несмотря на то, что еще в словаре Ушакова давалось общее толкование понятия применительно к любой поверх-

ности [5]. Исследования поверхностей проводятся в подавляющем большинстве только с точки зрения применения результатов исследования в производственной сфере. Безусловно, здесь существует целая группа параметров, позволившая перейти на уровень количественной оценки свойств исследуемой поверхности [4], и подобный подход пытаются реализовать во всех сферах человеческой производственной деятельности, в частности, при нормировании параметров поверхности изделий из древесины и древесных материалов [6].

Однако наши знания о поверхностях живых биологических объектов, например, растений, на сегодняшний день остаются по-прежнему крайне скудными. С одной стороны, многие годы человек был совершенно уверен, что знает о растениях всё, с другой стороны, столь простые (как кажется на первый взгляд) и незамысловатые объекты в эпоху освоения космического пространства не вызывают тотального интереса. Тем ни менее в семидесятых годах XX века был открыт «эффект лотоса», заключающийся в самоочистке листьев и цветов некоторых растений, основанный на особом наноструктурированном строении их поверхности [7], что стало понятно благодаря достижениям микроскопии. Известен также и «эффект розовых лепестков», наблюдавшийся каждым человеком, когда на поверхности бутона розы удерживаются капельки воды. Оказалось, что, несмотря на похожее строение, лепесток розы обеспечивает полный контакт капли с поверхностью за счет особенностей её формы [8].

Поверхность листа любого растения – это цельная комплексная система, обладающая возможностями фотосинтеза, водно-солевого обмена, терморегулирования и др. Оценка функционального состояния растений связана, прежде всего, с оценкой состояния их листьев.

Применение для этого электрофизиологических [9, 10] и оптических методов привело к необходимости исследования поверхности листьев растений, так как в процессе, например, электрофизиологического эксперимента на лист растения накладывается поверхностный металлический электрод, контактирующий с определенной частью листа. Моделирование зоны контакта «электрод-биообъект» предполагает знание не только параметров шероховатости электрода, но и параметров, описывающих неровности листьев. К тому же живая сущность объекта исследования предполагает и особые жесткие требования, предъявляемые к поверхности электрода, которые также должны быть основаны на знаниях особенностей поверхности листьев. Использование оптических методов позволяет оценить состояние растений по изменению отражательной способности их листьев. Но возможности этого метода во многом определяются шероховатостью поверхности, от которой происходит отражение, к тому же в данном случае можно говорить не только о возможных ошибках, возникающих в процессе измерения из-за недостатка информации об объекте исследования, но и об определяющем влиянии поверхности, формирующей поток излучения, который в зависимости от свойств поверхности листьев по-разному отразится и будет иметь различное направление.

В связи со всем вышесказанным интересным представляется именно количественное описание неровностей поверхности листьев растений, которые мы видим зачастую невооруженным глазом и можем ощутить путем прикосновения к ним. Однако поиск информации о параметрах шероховатости листьев, проведенный по разным источникам, не дал информации, вследствие чего и возникла необходимость проведения экспериментального исследования поверхности листьев разнообразных растений с целью определения параметров шероховатости, позволивших бы провести количественную оценку свойств поверхностей объектов растительного происхождения.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- 1) разработка методики регистрации рельефного изображения неровностей поверхностей листьев растений;
- 2) формирование атласа профилей листьев растений;
- 3) выбор основных параметров шероховатости, используемых для количественного описания поверхности листьев растений;
- 4) разработка методики оценки параметров шероховатости поверхности листьев растений по профилограммам;
- 5) классификации листьев в зависимости от свойств их поверхностей.

Для проведения экспериментального исследования использовалось следующее оборудование: малый инструментальный микроскоп (технические характеристики приведены в таблице 1), канцелярский нож, персональный компьютер с программным обеспечением Microsoft Excel и КОМПАС 3-DV12.

Таблица 1 – Технические характеристики малого инструментального микроскопа

Параметры	Значение
Пределы измерений, мм: в продольном направлении в поперечном направлении	0-75 0-25
Пределы измерения микрометрическими винтами, мм	0-25
Увеличение основного микроскопа	10×; 30×; 50×
Увеличение объективов	1×; 3×; 5×
Увеличение окуляра	10×
Поле зрения основного микроскопа, мм	21; 7; 4,2
Наибольший диаметр устанавливаемого в центрах изделия, мм	55
Наибольший диаметр изделия, устанавливаемого в призматических опорах, мм	100
Наибольшие габаритные размеры прибора, мм: длина/ширина/высота	580/450/510

В ходе эксперимента от листа растения отрезалась полоска шириной один сантиметр для того, чтобы обеспечить возможность вертикального расположения образца, и помещалась на стекло микроскопа. Осуществлялось наблюдение поверхности листа при помощи малого инструментального микроскопа, фотосъемка профиля поверхности и далее проводилось измерение расстояний верхней и нижней поверхностей листа относительно базовой линии для воссоздания профиля по результатам измерения. Для этого, перемещая объект исследования при помощи микрометрических винтов, регистрировались неровности профиля. После чего в программе Excel по результатам измерений строились профилограммы, необходимые для дальнейших исследований. Примеры фотографий профилей листьев нескольких видов растений и воссозданных профилограмм представлены в таблице 2.

Сложность регистрации рельефного изображения неровностей поверхностей листьев растений связана, прежде всего, с трудностями определения параметров поверхности именно живого объекта, так как листок достаточно быстро увядает при срыве его с растения, тем самым существенно меняя свои характеристики. Для сохранения поверхности объекта исследования в первоначальном состоянии, соответствующем функциональному состоянию всего растения в целом, экспериментальное исследование должно проводиться в очень короткие сроки.

Дальнейшая обработка профилограмм велась в программе КОМПАС 3-DV12, где строилась базовая линия, выделялась базовая длина и измерялись необходимые для дальнейших расчетов размеры. Примеры профилограмм, использованных для определения параметров шероховатости, представлены в таблице 3.

Анализ параметров и характеристик исследуемой поверхности показал, что в процессе обработки полученных профилограмм, можно определить экспериментально или рассчитать теоретически целый ряд значений, количественно описывающих поверхность, в соответствии со следующим алгоритмом: 1) определение базовой длины l ; 2) расчёт среднего

шага неровностей профиля: $S_m = \frac{1}{n} \sum_1^n S_{m_i}$; 3) расчёт высоты неровностей профиля по n

точкам: $R_Z = \frac{1}{n} \sum_1^n R_{Z_i}$; 4) определение наибольшей высоты неровностей профиля R_{max} ; 5)

определение высоты наибольшего выступа профиля R_p ; 6) определение глубины наибольшей впадины профиля R_v .

Таблица 2– Профили листьев растений



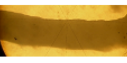


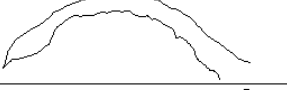

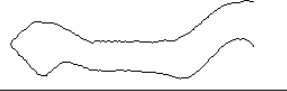

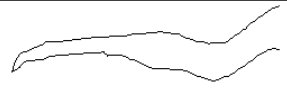

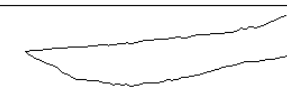

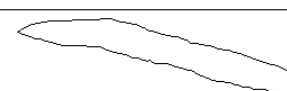
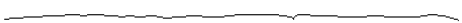
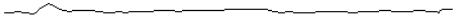
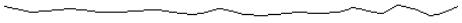
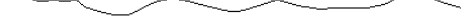








№	Фото	Профилограмма листа
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

Таблица 3 – Профилограммы листьев растений

№	Профиль	Профилограмма
1	верхний	
	нижний	
2	верхний	
	нижний	
4	верхний	
	нижний	
5	верхний	
	нижний	
6	верхний	
	нижний	
7	верхний	
	нижний	

Результаты обработки профилограмм, полученных с шести образцов листьев, сведены в таблице 4. Параметры микронеровностей определялись по профилям, построенным как для верхней, так и для нижней стороны листа каждого исследуемого растения. Поэтому в таблице для каждого параметра приведено два значения (для верхнего и нижнего профиля).

Таблица 4 – Результаты обработки профилограмм листьев растений

Параметры микронеровностей		№ листа					
		1	2	3	4	5	6
Базовая длина, мм	верхний	5,42	0,64	2,65	3,07	4,36	4,66
	нижний	5,11	0,75	1,87	1,07	3,03	6,43
Средний шаг неровностей, мм	верхний	0,7467	0,1375	0,2756	0,367	0,703	0,874
	нижний	0,976	0,2333	0,5163	0,27	0,75	0,96
Высота неровностей по «п» точкам, мм	верхний	0,0283	0,00743	0,0409	0,01635	0,0264	0,0479
	нижний	0,038	0,0236	0,0307	0,0127	0,0323	0,0522
Наибольшая высота неровностей, мм	верхний	0,05	0,0098	0,0695	0,0332	0,0438	0,0834
	нижний	0,09	0,0281	0,0649	0,0224	0,054	0,1301
Высота наибольшего выступа, мм	верхний	0,03	0,0055	0,0318	0,0119	0,0188	0,062
	нижний	0,08	0,0136	0,0407	0,0108	0,0532	0,0637
Глубина наибольшей впадины, мм	верхний	0,02	0,0062	0,0517	0,0318	0,0379	0,0481
	нижний	0,02	0,0214	0,0242	0,0116	0,0271	0,0903

Введение понятия базовой длины для исследуемой поверхности растительного объекта представляется достаточно условным, так как в отличие от искусственных объектов, где существует возможность выбора участка для анализа зачастую с существенным его увеличением, здесь возможности для варьирования в значительной степени ограничены размерами приготовленного образца и, конечно, размерами самого объекта. Так как исследования проводились над комнатными растениями и растениями, произрастающими в Орловской области, для которых характерны небольшие размеры листьев, то и значение базовой длины, т.е. длины, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности [11], оказались равными от 1 до 6,5 мм. Еще большую

сложность вызвало использование значений этого параметра из стандартного ряда, поэтому в таблице сведены значения, полученные в результате эксперимента и характеризующие размеры образца.

Представленные в таблице 4 примеры хорошо демонстрируют особенности поверхностей растительных объектов, для которых не выявлено значительных неровностей. Наибольшая высота неровностей, зафиксированная в процессе исследования, составляет 130,1 мкм, при этом минимальное значение этого параметра равно 9,8 мкм. Величина среднего шага неровностей изменяется в диапазоне от 137,5 до 976,0 мкм.

На основании полученных экспериментальных и расчетных данных можно провести определение величины отношения среднего шага S_m к высоте неровностей R_z , которое определяет понятие «шероховатость», так как для микронеровностей характерно выполнение следующего неравенства $\frac{S_m}{R_z} < 50$ [12]. В случае равенства этого отношения значени-

ям $\frac{S_m}{R_z} = 50 \dots 1000$ наблюдается волнистость поверхности. Определение предельных значений

этого отношения показало, что диапазон его изменения составляет от 1,1 до 99,6. Таким образом, для поверхности листьев растительных объектов может быть отмечено присутствие, как шероховатости, так и волнистости поверхности. Однако смещение отношения $\frac{S_m}{R_z}$ в область

больших значений наблюдается крайне редко, и в основной массе образцов наблюдалось присутствие шероховатости, когда $\frac{S_m}{R_z} = 6,74 \dots 26,63$.

Поэтому в качестве общего вывода можно сделать заключение о том, что для поверхностей листьев растительных объектов было зафиксировано наличие шероховатости, а комплекс параметров, использованный для количественного описания шероховатости поверхности, позволил осуществить переход от качественного субъективного восприятия особенностей поверхности листовых растений.

Стоит отметить, что кроме удовлетворения научного интереса при исследовании свойств объектов, детально не изученных ранее, результаты проведенного исследования имеют и практическое применение. Полученные значения параметров шероховатой поверхности листьев растений позволяют провести моделирование процесса отражения падающего излучения и учесть присутствие микронеровностей, что не представлялось возможным сделать ранее. Кроме этого появилась возможность сформулировать требования к используемому оборудованию при изучении оптических характеристик живых объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – 4-е изд. – М.: Советская энциклопедия. – 1986. – 1600 с.: ил.
2. Якушев А.И., Воронцов Л.Н., Федотов Н.М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М.: Машиностроение. – 1985. – 354 с.: ил.
3. Чертежная документация. – Режим доступа: <http://gk-drawing.ru/>. – Загл. с экрана.
4. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
5. Словopedia. Толковый словарь Ушакова. – Режим доступа: <http://www.slovopedia.com/3/192-0.html>. – Загл. с экрана.
6. ГОСТ 7016-82. Изделия из древесины и древесных материалов. Параметры шероховатости поверхности.
7. Neinhuis C., Barthlott W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces // *Annals of Botany*. – 1997. – V. 79. – P. 667–677.
8. Школа жизни.ру. Познавательный журнал. – Режим доступа: <http://shkolazhizni.ru/archive/0/n-23002/>. – Загл. с экрана.
9. Бондарева Л.А., Войтевич В.Н. Измерение биоэлектрического потенциала растений: современное состояние и перспективы исследований // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 6-2 (284). – С. 41-43.

10. Бондарева Л.А. Исследование нормальности распределения вероятности результатов измерения биоэлектрических потенциалов растений // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – № 5 (295). – 2012. – С.115-118.
11. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения.
12. Интернет портал о машиностроении. –Режим доступа: <http://www.machinebuilder.ru/>. –Зagl. с экрана.

Бондарева Людмила Александровна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», Орел

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Приборостроение метрология и сертификация»

E-mail: 270174@mail.ru

Суханова Марина Владимировна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», Орел

Магистр кафедры «Приборостроение метрология и сертификация», инженер лаборатории «Биофизических исследований»

E-mail: marina89.07@mail.ru

L.A. BONDAREVA, M.V. SUKHANOVA

STUDY OF SURFACE ROUGHNESS LEAVES OF PLANTS

In the article has made an analysis of the relevance of flora objects research and represented the results of leaf surface study, which allows to quantify the properties of object surfaces of plant origin. A method for determining the parameters and characteristics of the surface of plant leaves, providing construction profilograms and further evaluation, using of which led to the conclusion of a roughness on the surface of the objects. Has made the analysis obtained experimentally and theoretically parameter roughness leaves.

Keywords: roughness, surface, undulation, profilogram, roughness parameter, foliage, foliage, plants.

BIBLIOGRAPHY

1. Sovetskij jenciklopedicheskiy slovar' / Gl. red. A.M. Prohorov. 4-e izd. – M.: Sovetskaja jenciklo-pedija. 1986. 1600 s.: il.
2. Jakushev A.I., Voroncov L.N., Fedotov N.M. Vzaimozamenjajemost', standartizacija i tehničeskie izmenenija. – M.: Mashinostroenie. 1985. 354 s.: il.
3. Chertjozhnaja dokumentacija. – Rezhim dostupa: <http://gk-drawing.ru/>. Zagl. s jekrana.
4. GOST 2789-73. Sherohovatosť poverhnosti. Parametry i harakteristiki.
5. Slovopedija. Tolkovyj slovar' Ushakova. Rezhim dostupa: <http://www.slovopedia.com/3/192-0.html>. Zagl. s jekrana.
6. GOST 7016-82. Izdelija iz drevesiny i drevesnyh materialov. Parametry sherohovatosť poverhno-sti.
7. Neinhuis C., Barthlott W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces // *Annals of Botany*. 1997. V. 79. P. 667–677.
8. Shkola zhizni.ru. Poznavatel'nyj zhurnal. Rezhim dostupa: <http://shkolazhizni.ru/archive/0/n-23002/>. Zagl. s jekrana.
9. Bondareva L.A., Vojtevič V.N. Izmerenie bioelektričeskogo potenciala rastenij: sovremennoe so-stojanie i perspektivy issledovanij // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii*. – 2010. – № 6-2 (284). – S. 41-43.
10. Bondareva L.A. Issledovanie normal'nosti raspredelenija verojatnosti rezul'tatov izmerenija bioelektričeskikh potencialov rastenij // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii*. – № 5 (295). – 2012. – S.115-118.
11. GOST 25142-82. Sherohovatosť poverhnosti. Terminy i opredelenija.
12. Internet portal o mashinostroenii. Rezhim dostupa: <http://www.machinebuilder.ru/>. Zagl. s jekrana.

Bondareva Lyudmila Alexandrovna

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of Technical Sciences, associate professor of “Instrument Engineering Metrology and Certification”

E-mail: 270174@mail.ru

Sukhanova Marina Vladimirovna

State University – Education Science Production Complex, Orel

Magistr cathedra “Instrument Engineering Metrology and Certification”, engineer of laboratory “Biophysical research”

E-mail: marina89.07@mail.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 языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
 - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
 - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
 - не применять произвольные словообразования;
 - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

Рисунок 1 – Текст подписи

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.gu-unprk.ru.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес учредителя

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 42-00-24
Факс (4862) 41-66-84
www.gu-unpk.ru
E-mail: unpk@ostu.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Григорьева О.Ю.
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать 14.11.2013 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 10.
Тираж 600 экз.
Заказ № 141/14П1

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.