

Редакционный совет:

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

Главный редактор серии:

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.

Редколлегия:

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф.
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф.
Дмитриев А.М. д-р техн. наук, проф.,
член-кор. РАН
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф.
Зубарев Ю.М. д-р техн. наук, проф.
Зубчинов 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
Корндорф С.Ф. д-р техн. наук, проф.
Малинин В.Г. д-р физ.-мат. 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 редколлегии серии:

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

Зарег. в Министерстве Российской
Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовой информации.
Свидетельство: ПИ № ФС77-35719
от 24 марта 2009 года

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

© ОрелГТУ, 2009

Содержание

Механика

Лазуткин Г.В., Антипов В.А., Борзенков М.И., Рябков А.Л. Универсальный метод решения задачи о колебаниях виброзащитных гистерезисных систем..... 3
Корнеева Е.Н., Корнеев Ю.С. Численные методы решения уравнений движения..... 10
Мустафаев А.Б. Моделирование зарождения трещины в неравномерно нагретом цилиндре..... 15

Физика

Фроленкова Л. Ю. Методика расчета энергии адгезии с учетом тройного взаимодействия частицы среды..... 22
Поландов Ю.Х., Власенко С.А. Об одном подходе к интегрированию по поверхности в векторном поле..... 27
Рустамов Б.Э. Моделирование локального разрушения равномерно вращающегося горящего твердого топлива..... 31

Технологии, оборудование и инструмент упрочняющей и отделочной обработки, технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин

Хромов В.Н., Зайцев С.А. Технология упрочнения лап культиватора газопламенным напылением..... 37
Жильцов Е. В. Формирование микрогеометрии поверхности заготовки в процессе электроабразивного шлифования..... 42
Моисеева Д.В., Емельяненко А.А., Полянчиков Ю.Н. Абразивные материалы и инструмент в России: производство и рынок начала XXI века..... 46

Моделирование технологических процессов

Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О. Математическое моделирование упрочняющей валковой штамповки..... 54
Вдовин С.И., Михайлов В.Н., Татарченков Н.В. Деформации трубы при гибке поперечной силой..... 59
Давыдов В.М., Ледков Е.А., Гиль А.В., Химухин С.Н. Исследование процессов стабилизации электронной обработки..... 63
Ешуткин Д.Н., Абдурашитов А.И., Журавлева А.В. Динамическая и математическая модели движения корпуса гидравлических ручных машин ударного действия..... 72
Мельников В.П., Басенин М.А. Конструктивные признаки и методология применения различных режимов управления накладными шаговыми системами и роботами с элементами искусственного интеллекта..... 76

Приборостроение и системы управления

Подмастерьев К.В., Петрова О.С. Экспериментальные исследования устройства контроля и регулирования температуры в помещении..... 86

Испытания, контроль, диагностика, мониторинг

Мишин В.В. Математическая диагностическая модель электрического сопротивления подшипника качения с учетом фактора пластической деформации микронеровностей в процессе приработки..... 93
Комова В.И. Исследование механизма экстракции ванадия (V) в системе 5,7- дибромоксинолин в смеси растворителей в целях разработки методов контроля и диагностики сточных вод титано-магниевого производства на содержание ионов ванадия (V)..... 101
Малиновский Е.Л., Дунаев А.В. Возможности использования методов фотоплетизмографии и тканевой оксиметрии для контроля и оценки эффективности низкоинтенсивной лазерной терапии..... 105
Пахолкин Е.В. Предпосылки использования методов электрического контроля при оценке состояния и функционирования в трибосопряжениях «третьего тела»..... 116



Scientific and technical journal
of Orel State Technical University
The journal is published since 1995
The journal is published 6 times a year
№ 4/276(575) 2009
July-August

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

Izvestia Orel State Technical University

The founder – The State Higher Education Professional Institution
Orel State Technical University

Contents

Mechanics

- Lazutkin G.V., V.A. Antipov, M.I. Borzenkov, A.L. Ryabkov* A universal method for solving a task related to vibrations in vibroprotective hysteresis systems..... 3
Korneeva E.N., Korneev Y.S. Numerical methods of decision of movement equations..... 10
Mustafayev A.B. Modelling of nucleation of the crack in non-uniformly heated the cylinder..... 15

Physics

- Frolenkova L. Yu.* Design procedure energy adhesion with a glance triple interaction part environment..... 22
Polandov U.H., Vlasenko S.A. About one approach to integration on the surface in the vector field... 27
Rustamov B. Modelling of local fracture of uniformly rotating burning solid fuel..... 31

Technologies, equipment and instrument for strengthening and finishing treatment, engineering support of performance abilities of machine parts

- Hromov V.N., Zaycey S.A.* Technology of cultivator slice shares hardening by flame spraying..... 37
Jhiltsov E.V. Formation of microgeometry of surface of preparation in process of electroabrasive grinding..... 42
Moiseeva D.V., Emelyanenko A.A., Polyanchikov Yu.N. Abrasive materials and tools in russia: manufacture and the market of the beginning of 21 centuries..... 46

Modeling engineering processes

- Golenkov V.A., Radchenko S.J., Dorohov D.O.* Mathematical design by the method of hardening rolls stamping..... 54
Vdovin S.I., Mikhailov V.N., Tatarchenkov N.V. Tube deformation at lateral bending force..... 59
Davydov V.M., Ledkov E.A., Gil A.V., Khimukhin S.N. Research of processes of stabilization of electrospark processing..... 63
Eshutkin D.N., Abdurashitov A.I., Zhuravlyova A.V. Dynamic and mathematical models of the case's movement of any hydraulic manual machines of shock action..... 72
Melnikov V.P., Basenin M.A. Constructive indications and methodology of application of different conditions of control of waybill step-by-step systems and robots with dements of artificial intelligence..... 76

Instrument Engineering

- Podmasterjev K.V., Petrova O.S.* Experimental researches of the device of the control and regulation of temperature in a room..... 86

Tests, control, diagnostics, monitoring

- Mishin V.V.* The mathematical diagnostic model of electric resistance of the bearing rolling taking into account the factor of plastic deformation of micro-roughnesses in the beginnings of work of the bearing..... 93
Komova V.I. The research of the vanadium (v) extraction mechanism in a system of dbo in a solvents mixture with a view of creation of control and diagnostic methods of titanium-magnesium production sewage in vanadium (v) ions content 101
Malinovskiy E.L., Dunaev A.V. Possibilities to use methods photoplethysmography and tissue reflectance oximetry for controlling and assesment of the effectiveness of the low level laser therapy..... 105
Pakholkina E.V. Prerequisites for the use of electrical control in assessing the "third body" status and functioning in friction zone..... 116

Editorial council:

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president
Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president
Borzenkov M.I. Candidat Sc. Tech.,
Assistant Prof.
Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Popova L.V. Doc. Sc. Ec., Prof.
Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.
Konstantinov I.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

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.
Podmasterjev K.V. Doc. Sc. Tech.,
Prof.

Editorial Committee

Babichev A.P. Doc. Sc. Tech., Prof.
Vdovin S.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Dmitriev A.M. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Corresponding Member of RAS
Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof.
Zubarev Y.M. Doc. Sc. Tech., Prof.
Subchaninov V.G. Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.
Ivanov B.R. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kolesnikov K.S. Doc. Sc. Tech.,
Prof., Academician of RAS
Korndorf S.F. Doc. Sc. Tech., Prof.
Malinin V.G. Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.
Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.
Panin V.E. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Academician of RAS
Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.
Smolenzhev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof.

Responsible for edition:

Grigorieva O.Yu.

Address

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

Journal is registered in State
Committee of Russian Federation
on printing. The certificate of
registration ПИ № ФС77-35719
from 24.03.2009

Index on the catalogue of the «Pressa
Rossii» 29504

© OSTU, 2009

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

УДК 620.318.6

Г.В. ЛАЗУТКИН, В.А. АНТИПОВ, М.И. БОРЗЕНКОВ, А.Л. РЯБКОВ

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О КОЛЕБАНИЯХ ВИБРОЗАЩИТНЫХ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ СИСТЕМ¹

Рассматривается простейшая форма аппроксимации неупругого сопротивления в системах конструкционного демпфирования (СКД), отображающая главные особенности характера его нелинейности. С помощью комбинированного асимптотического метода разложений решения нелинейного дифференциального уравнения движения виброзащитных систем (ВС) в сочетании с предложенной формой аппроксимации деформационных характеристик СКД исследуются особенности квазигармонических колебаний виброзащитных систем. Полученное решение задачи о колебаниях ВС учитывает влияние высших гармонических составляющих колебаний, зависящих от характера нелинейности петель гистерезиса СКД.

Ключевые слова: виброзащитные системы, гистерезис, аппроксимация, уравнение движения, квазигармонические колебания.

In damping structural systems (DSS) the simplest approximation form of non-elastic resistance is considered as the basic feature of its nonlinearity. To do research into quasiharmonic vibrations in vibroprotective systems it is suggested to use this approximation form of DSS deformation in combination with an asymptomatic method of resolution for solving a nonlinear differential equation of motion. The solution of the task related to vibrations in vibroprotective systems takes into account the influence of higher harmonic components depending upon nonlinearity of hysteresis characteristics in damping structural systems.

Key words: vibroprotective system, hysteresis, approximation, equation of motion, quasiharmonic vibration.

Создание теоретических основ проектирования виброзащитных систем (ВС) с существенно нелинейным конструкционным гистерезисом требует всестороннего анализа особенностей поведения их колебаний. При этом необходимо учитывать, что применяемые для целей виброзащиты в ВС сложные системы конструкционного демпфирования (СКД) чрезвычайно разнообразны и включают в себя множество типов виброизолирующих и демпфирующих устройств из материала МР, отрезков тросов, пластин, сеток и т.п.

Обычно, способность СКД рассеивать энергию колебаний оценивают с помощью упругогистерезисных характеристик, получаемых в виде семейств петель гистерезиса при циклическом деформировании устройств. Последствие с помощью методов теории подобия и анализа размерностей решают задачи математического моделирования процессов деформирования различных классов СКД и получения решений нелинейных дифференциальных уравнений движения ВС в обобщенном виде [1]:

$$\ddot{x} + \Phi(\sigma, \dot{x}, x, A) = \beta \cos(\omega t + \alpha), \quad (1)$$

где $R = \Phi(\sigma, \dot{x}, x, A)$ - упругогистерезисная характеристика СКД, заданная в безразмерном виде:

$R, \ddot{x}, \dot{x}, x, A$ – соответственно безразмерные: нагрузка (реакция СКД), ускорение, скорость, перемещение и амплитуда колебаний;

¹ Работа выполнена в рамках договора №1-06 от 27 апреля 2006 г., о научно-техническом и педагогическом сотрудничестве Орловского государственного технического университета (ОрелГТУ) и Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС на 2006-2010 гг.)

$\sigma = \text{sign} \dot{x}$ - ступенчатая функция, определяемая знаком скорости;

$\beta = \cos(\omega t + \alpha)$ - возбуждающая нагрузка;

α - угол сдвига по фазе между нагрузкой и перемещением;

β, ω, t - безразмерные амплитуда возбуждения, частота и время, соответственно.

Аналитические приближенные методы решения этого уравнения позволяют сравнительно просто получать теоретически обозримые результаты исследования нелинейных колебаний и создавать на их основе методики расчета ВС с конструкционным демпфированием [1, 2].

Наиболее распространенные приближенные методы исследования колебаний ВС, как правило, основываются на предположении о гармоническом характере решения уравнения движения (1). В частности, для симметричных упругогистерезисных характеристик СКД его принимают в виде

$$x = A \cos \omega t. \quad (2)$$

При таком подходе реальные деформационные характеристики СКД заменяют на линеаризованные, представляемые в виде сумм условной упругой и неупругой составляющих:

$$R \cong \gamma^2(A)x + \sigma p_m(A)\sqrt{A^2 - x^2}, \quad (3)$$

где $\gamma^2(A)$ и $p_m(A)$ - соответствующие коэффициенты жесткости. В дальнейшем их будем обозначать γ^2 и p_m , подразумевая при этом зависимости коэффициентов от амплитуд A . Заметим, что нахождение коэффициентов γ^2 и P_m методом гармонической линеаризации по Чебышеву, обеспечивает в первом приближении получение совпадающих результатов решения уравнения (1) с классическими вариационными методами [1], а именно:

$$A^2 \left[\gamma^2 - \omega^2 + p_m^2 \right] = \beta^2; \quad (4)$$

$$\text{tg} \alpha = \frac{p_m}{\gamma^2 - \omega^2}.$$

Однако, как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований [1, 2, 3], распространение методов линеаризации на многие классы СКД, может приводить в расчетах к существенным погрешностям: до 20% - по резонансным частотам и до 100% и более - по амплитудам резонансных колебаний ВС. Причем величины погрешностей в значительной мере связаны с демпфирующей способностью СКД, а также с уровнями деформации и возбуждающих динамических нагрузок и, как правило не зависят от метода линеаризации. Особо следует подчеркнуть, что проведенные ранее глубокие исследования нелинейных колебательных систем различного типа [4, 5] с неупругим сопротивлением пропорциональным скорости показали высокую точность гармонических решений уравнения (1) аналогичных (4) даже при существенной нелинейности упругих характеристик и полном отсутствии демпфирования.

Поэтому, одной из причин возникновения погрешностей решений (4) может быть характер нелинейности неупругой составляющей реакции СКД. Так, например, форма неупругой составляющей гистерезиса в координатах $R - \bar{x}$, где $\bar{x} = x/A$, может изменяться от близкой к эллипсу до параллелограмма с практически вертикальными стенками, характерными для сухого трения. Другой причиной, напрямую связанной с указанной, может служить неправомерность выбора гармонической формы решения (2) уравнения движения (1) и линеаризация деформационных характеристик СКД в виде (3).

Проанализируем решение (4) для СКД с линейной упругой характеристикой $\gamma^2 = 1$ и сухим трением, получаемое в виде:

$$A = \sqrt{\frac{\beta^2 - 16}{1 - \omega^2}}.$$

Следовательно, для существования решений системы уравнений (4) необходимо выполнения условия $\beta > 4/\pi$, когда на резонансных режимах колебаний ($\omega = 1$) амплитуда деформации СКД не ограничены. Указанное обстоятельство недопустимо при проведении проекторочных расчетов ВС с СКД, так как на их резонансных режимах $\beta < 4/\pi$, а амплитуды деформаций ограничены. Аналогичный результат приведен и в монографии [6]. Вместе с тем в работе [7] показано, что при учете в решении уравнения движения (1) высших гармонических колебаний ВС можно получить приближенное выражение для амплитуды колебаний ВС в виде:

$$A = \sqrt{\frac{\beta^2}{\omega^2} - \frac{16}{\pi^2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{1-i^2\omega^2} \right)^2}, \quad (5)$$

где $i \in [1, 3, 5 \dots n]$ номер учитываемой гармоники колебаний. При этом погрешность определения амплитуды колебаний ВС по сравнению с точным значением

$$A = \sqrt{\frac{\beta^2}{\omega^2} - \frac{1}{\omega^2} \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{2\omega}}. \quad (6)$$

существенно зависит от числа учитываемых гармоник n и значения β . При увеличении β до значений, близких к $4/\pi$ погрешности могут достигать до 100 % и более, в зависимости от числа учитываемых гармоник n . При увеличении n (в расчетах до 1001) приближенное решение (5) асимптотически стремится к точному решению (6).

Таким образом, гармоническая форма (2) приближенного решения нелинейного дифференциального уравнения движения (1), и связанная с ней линейаризация упругогистерезисных характеристик СКД не могут обеспечить создание достоверных методов расчета СКД, применяемых в ВС. Поэтому разработка методов получения приближенных решений уравнения (1), позволяющих достаточно просто учитывать влияние нелинейности неупругого сопротивления СКД на порождаемые ей высшие гармонические составляющие в законе движения ВС, является важной и актуальной задачей.

Представим реакцию СКД при циклическом деформировании в виде суммы двух функций

$$R = \Phi_y(x, A) + \Phi_m(\sigma, x, A),$$

где $\Phi_y = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2}$; $\Phi_m = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{2}$; соответственно условная упругая и неупругая составляющие; Φ_1 и Φ_2 процессы нагрузки $\dot{x} > 0$ и разгрузки $\dot{x} < 0$, соответственно.

Для описания составляющей Φ_y воспользуемся полиномами Чебышева [1], причем не усложняя задачи ограничимся, как и выше гармонической линейаризацией (3):

$$\Phi_y(x, A) \approx \Phi_y^*(x, A) = \gamma^2 x. \quad (7)$$

Выберем вид аппроксимирующей - $\Phi_m^*(\sigma, \bar{x}, A)$ и весовой - $f(\bar{x})$ функций, которые бы обеспечили минимальную среднеквадратическую погрешность приближения для неупругого сопротивления, записываемую в виде функционала:

$$\min \int_{-1}^1 \left[\Phi_m(\sigma, \bar{x}, A) - \Phi_m^*(\sigma, \bar{x}, A) \right]^2 f(\bar{x}) d\bar{x}. \quad (8)$$

Решение подобной задачи в замкнутом виде весьма затруднительно, вследствие чего воспользуемся следующими предпосылками:

1. Нелинейность гистерезисных функций в наибольшей степени проявляется на концах отрезка $\bar{x} \in [-1, 1]$ и особенно при смене знака скорости деформации, когда коэффициент жесткости мгновенно изменяется во много раз. Следовательно, в структуру аппроксимирующей функции неупругого сопротивления должны входить члены,

содержащие знак скорости $\sigma = \text{sign } \dot{x}$, причем весовая функция должна увеличивать значимость приближения на концах отрезка $\bar{x} \in [-1, 1]$.

2. Силы неупругого сопротивления обычно принимают смещенными по фазе относительно перемещения на угол $\pi/2$, что предполагает наличие в аппроксимирующих функциях членов $\sqrt{1 - \bar{x}^2}$.

3. Структура аппроксимирующей функции в зависимости от амплитуды деформации A , должна обеспечивать отображение всего спектра изменения форм петель гистерезиса (от эллиптических до параллелограммов).

4. При нахождении коэффициентов аппроксимации выбор весовой функции должен доставлять равенство площадей искомым петлям гистерезиса к приближаемым.

Таким образом, можно записать

$$\Phi_m^*(\sigma, \bar{x}, A) = \Phi_m^*(\sigma, \sqrt{1 - \bar{x}^2}, A),$$

или же в самом простейшем виде аппроксимации со степенью не выше единицы

$$\Phi_m^* = \sigma [T(A) + p_m(A) |\sqrt{1 - \bar{x}^2}|] \quad (9)$$

При необходимости коэффициенты аппроксимации $T(A)$ и $p_m(A)$ могут быть представлены в виде функций аппроксимированных полиномами Чебышева [1].

$$\Phi_m^* = \sigma \left[\sum_{q=0}^m T_q A^q + p_{mq} A^q |\sqrt{1 - \bar{x}^2}| \right]; \quad q \in \overline{1, 2, \dots, m};$$

T_q и p_{mq} – коэффициенты полиномов Чебышева

Воспользовавшись исследованием функционала (8) для аппроксимации в форме (9) несложно показать, что весовая функция по п.4 предпосылок может быть двух типов: $f_1(\bar{x}) = 1$; $f_2(\bar{x}) = (\sqrt{1 - \bar{x}^2})^{-1}$. Первая обеспечивает равномерное приближение с весом, равным единице на всем отрезке $[-1, 1]$, вторая – с весом до бесконечности на концах указанного отрезка. Окончательно, с учетом предпосылок п.1, выбираем

$$f_2(\bar{x}) = (\sqrt{1 - \bar{x}^2})^{-1}.$$

Тогда минимум функционала в пространстве переменных T и p_m определяется с помощью системы двух интегральных уравнений

$$\begin{cases} \int_{-1}^1 \left[\Phi_m - \sigma p_m |\sqrt{1 - \bar{x}^2}| + T \right] \frac{d\bar{x}}{\sqrt{1 - \bar{x}^2}} = 0; \\ \int_{-1}^1 \left[\Phi_m - \sigma p_m |\sqrt{1 - \bar{x}^2}| + T \right] d\bar{x} = 0. \end{cases}$$

Как видно последнее уравнение обеспечивает выполнение требований по равенству площадей искомым петлям гистерезиса с аппроксимируемыми. Заменяя переменную \bar{x} в данной системе уравнений на $\phi = \arccos \bar{x}$, и разрешая ее относительно коэффициентов аппроксимации, получим:

$$p_m = \frac{4}{8 - \pi^2} \left[\int_0^\pi \Phi_m(\sigma, \cos \phi, A) \left(1 - \frac{\pi}{2} \sin \phi \right) d\phi \right]; \quad (10)$$

$$T = \frac{4}{8 - \pi^2} \left[\int_0^\pi \Phi_m(\sigma, \cos \phi, A) \left(\sin \phi - \frac{\pi}{4} \right) d\phi \right]. \quad (11)$$

Таким образом, упругогистерезисные характеристики СКД с учетом простейшей формы записи нелинейности неупругой составляющей окончательно запишем в виде:

$$R \cong \gamma^2 x + \sigma (T + p_m |\sqrt{A^2 - x^2}|), \quad (12)$$

где коэффициенты аппроксимации γ^2 , T , p_m вычисляются с помощью соотношений (7), (10), (11) на основе теоретических или экспериментально найденных значений функции Φ .

Получим решение уравнения движения (1), в котором функция, описывающая реакцию СКД, заменяется на эквивалентную в форме (12).

Будем рассматривать квазигармонические колебания ВС, когда за период ω^{-1} скорость движения обращается в ноль только дважды. Тогда для симметричных деформационных характеристик СКД закон движения ВС можно записать в виде:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos \omega t + B_i \sin i \omega t, \quad (13)$$

причем
$$\sum_{i=1}^n A_i = A; \quad \sum_{i=1}^n i B_i = 0; \quad i \in \{3, 5, \dots, n\}. \quad (14)$$

Воспользуемся комбинированным асимптотическим методом (КАМ) разложения решений уравнения движения (1), которое представим в виде системы линейных дифференциальных уравнений по степеням порядка приближения ε^d [7]. Ограничиваясь первым порядком приближения ($d=1$) и учитывая, что коэффициенты разложения для возбуждающей нагрузки $\beta_{C1} = \beta_{S0} = 0$, запишем:

$$\varepsilon^0 \quad \ddot{x}_0 + \gamma^2 x_0 = \beta_{C0} \cos \omega t; \quad (15)$$

$$\varepsilon^1 \quad \ddot{x}_1 + \gamma^2 x_1 = \beta_{S1} \sin \omega t - \sigma \left(p_m \left| \sqrt{A_0^2 - x_0^2} \right| + \dot{\vartheta} \right); \quad (16)$$

$$x \cong x_0 + x_1; \quad (17)$$

$$\beta^2 = \beta_{C0}^2 + \beta_{S1}^2. \quad (18)$$

Порождающее решение уравнения (15) имеет гармоническую форму

$$x \approx x_0 = A_0 \cos \omega t, \quad (19)$$

где $A_0 = \frac{\beta_{C0}}{\gamma^2 - \omega^2}$.

Для функции σT запишем разложение в виде гармонического ряда Фурье:

$$\sigma T = \frac{4T}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \sin i \omega t.$$

Подставляя порождающее решение (19), а также найденное разложение Фурье в уравнение (16), получим:

$$\ddot{x}_1 + \gamma^2 x_1 = \left(\beta_{S1} - p_m A_0 - \frac{4T}{\pi} \right) \sin \omega t - \frac{4T}{\pi} \sum_{i=3}^n \frac{1}{i} \sin i \omega t$$

Найдем частное решение этого уравнения и, учитывая порождающее решение (19), запишем закон перемещения ВС (17) в виде

$$x = \frac{\beta_{S1} - p_m A_0 - \frac{4T}{\pi}}{\gamma^2 - \omega^2} \sin \omega t - \frac{4T}{\pi} \sum_{i=3}^n \frac{1}{i(\gamma^2 - i^2 \omega^2)} \sin i \omega t + \frac{\beta_{C0}}{\gamma^2 - \omega^2} \cos \omega t. \quad (20)$$

С учетом ограничений накладываемых на гармоники квазигармонических колебаний, и полученным выражением для полной амплитуды первой гармоники A_0 можно записать:

$$\beta_{C0} = A_0 (\gamma^2 - \omega^2);$$

$$\beta_{S1} = p_m A_0 + \frac{4T}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma^2 - \omega^2}{\gamma^2 - i^2 \omega^2}.$$

Воспользовавшись условием (18), запишем систему уравнений для определения параметров квазигармонических колебаний с амплитудой $A \equiv A_0$:

$$\begin{cases} A_0^2 (\gamma^2 - \omega^2)^2 + \left(p_m A_0 + \frac{4T}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma^2 - \omega^2}{\gamma^2 - i^2 \omega^2} \right)^2 = \beta^2; \\ \operatorname{tg} \alpha = \frac{p_m}{\gamma^2 - \omega^2} + \frac{4T}{\pi A} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\gamma^2 - i^2 \omega^2}. \end{cases}$$

Вводя новую переменную $\bar{\omega} = \omega / \gamma$ и, сопоставляя структуры приближенного решения (5) при $n \rightarrow \infty$ с точным – (6), запишем:

$$\frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{1 - i^2 \bar{\omega}^2} = \frac{1}{\bar{\omega}} \operatorname{tg} \frac{\pi}{2\bar{\omega}}.$$

В результате окончательно получим:

$$\begin{cases} A_0^2 \gamma^4 (1 - \bar{\omega}^2)^2 + \left[p_m A_0 + \frac{T}{\bar{\omega}} (1 - \bar{\omega}^2) \operatorname{tg} \frac{\pi}{2\bar{\omega}} \right]^2 = \beta^2; \\ \operatorname{tg} \alpha = \frac{p_m}{\gamma^2 (1 - \bar{\omega}^2)} + \frac{T}{\bar{\omega} A_0} \operatorname{tg} \frac{\pi}{2\bar{\omega}}. \end{cases} \quad (21)$$

Решение этой системы уравнений является основой для проведения анализа влияния параметров ВС и возбуждающей нагрузки на амплитуду ее колебаний (деформации СКД). Вместе с тем найденный закон перемещения ВС в форме (10) позволяет определить гармонический состав колебаний и интенсивность высших гармоник, возникающих из-за нелинейности неупругой составляющей реакции СКД.

Уровень сложности и методика разрешения системы уравнений (21) относительно входящих в нее переменных аналогичны, как и для системы (4), полученной для гармонической линеаризации. Вместе с тем можно видеть, что при $p_m = 0$ – случай эквивалентной линеаризации неупругого сопротивления СКД сухим трением – получаем решение первого уравнения системы (21) в виде решения (6). При $T = 0$ система уравнений (21) преобразуется к виду (4), соответствующему гармонической линеаризации.

ВЫВОДЫ

1. Применение методов линеаризации упругогистерезисных характеристик СКД для исследования колебаний ВС гармонического характера обеспечивает получение достоверных результатов в ограниченном диапазоне возбуждающих нагрузок и деформации и не для каждого типа устройств. Это связано с нелинейностью неупругой составляющей реакции СКД, порождающей существенные по значимости высшие гармонические составляющие колебаний ВС.

2. Математически корректное исследование квазигармонических колебаний ВС с учетом указанных выше составляющих обеспечивается применением комбинированного асимптотического метода разложений решений нелинейного дифференцированного уравнения движения в сочетании с простейшей формой аппроксимации упругогистерезисных характеристик СКД со степенью переменных не выше единице. Полученное с их помощью решение задачи о квазигармонических колебаниях ВС носит универсальный характер и позволяет учесть влияние реальных форм петель гистерезиса СКД от близких к эллиптическим до параллелограммов с вертикальными стенками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазуткин Г.В. Виброизоляторы из материала МР (тип ДКУ). – Деп. в ВИНТИ - №1977 – 85 от 19.03.85. – б/о № 771, библиограф. №7 – 22 с.

2. Бузицкий В.Н. Расчет втулочных виброизоляторов / В.Н. Бузицкий, А.А. Тройников / Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: сб. научн. трудов. Вып. 2(73). – Куйбышев: КуАИ, 1975.
3. Эскин И.Д. Исследование вынужденных периодических колебаний упругогистерезисных систем с одной степенью свободы и с петлей гистерезиса в форме параллелограмма / И.Д. Эскин / Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: сб. научн. трудов. Вып.51. – Куйбышев: КуАИ, 1972. – С. 24 - 34.
4. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах / Т. Хаяси. – М.: Мир, 1968. – 432с.
5. Боголюбов Н.Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. – М.: Наука, 1974. – 504с.
6. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
7. Лазуткин Г.В. Вынужденные периодические колебания виброзащитных систем с конструкционным гистерезисом / Г.В. Лазуткин / Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: сб. научн. трудов. - Куйбышев: КуАИ, 1986. – С.81-89.

Лазуткин Геннадий Васильевич

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика»
443066, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18
Тел. (846) 999-52-53

Антипов Владимир Александрович

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара
Доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерная графика»
443066, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18
Тел. (846) 999-52-53

Борзенков Михаил Иванович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 43–48–90
E-mail: bim@ostu.ru

Рябков Александр Леонидович

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара
аспирант кафедры «Инженерная графика»
443066, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18
Тел. (846) 999-52-53

УДК 519.62

Е.Н. КОРНЕЕВА, Ю.С. КОРНЕЕВ

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ

В работе представлены численные методы решения уравнений разгона привода машины с пускозащитной муфтой.

Ключевые слова: *машинный агрегат, привод, муфта, дифференциальное уравнение.*

Article is devoted to numerical methods of decision of equations of a dispersal drive gear machine with protectional clutch.

Key words: *engine unit, drive gear, clutch, differential equation.*

Пускозащитные муфты [1] нашли широкое применение, как в машиностроении так и в приборостроении благодаря их относительной простоте и минимальным затратам в изготовлении.

Работу муфты удобнее всего рассматривать по периодам.

1-ый период. От начала движения до касания фрикционных дисков. В этот период включается электродвигатель и начинает разгоняться до $(0,7 - 0,8)\omega_{ном}$ угловой скорости без нагрузки, при которой начинают касаться фрикционные диски. Этот период характеризуется значительной величиной момента двигателя при величине момента муфты, близком к нулю, так как шары 4 перемещаются от оси вращения муфты, сжимая только пружину 10, и не создают момента на муфте. Момент сопротивления машины в покое значительно больше момента, передаваемого муфтой и поэтому ведомая полумуфта вместе с рабочей машиной неподвижна.

2-ой период. Начинает сжиматься пружина 7, электродвигатель разгоняется без нагрузки. В этом периоде вначале возможен случай, когда центробежная сила, действующая на шары, недостаточна для сжатия пружины 7, а только увеличивает силы на фрикционных поверхностях. Здесь момент сил трения во фрикционном узле муфты меньше момента сил сопротивления со стороны рабочей машины, то есть $T_f < T_c$.

3-ий период. Момент сил трения во фрикционном узле муфты становится больше момента сил сопротивления со стороны рабочей машины, то есть $T_f > T_c$, и начинается движение ведомой полумуфты 3. Период продолжается до тех пор, пока не наступит установившееся движение.

4-ый период. Установившееся движение – характерно тем, что происходит выравнивание угловых скоростей ведущей и ведомой систем, то есть относительное движение полумуфт 1 и 3 отсутствует, и муфта работает как единое целое, передавая номинальный момент.

5-ый период. Это режим перегрузки, действующий со стороны рабочей машины или двигателя.

Второй этап начинается с момента, когда фрикционные диски 2 и 6 прижаты друг к другу, пружина 10 сжата полностью и начинает действовать на фрикционные поверхности через шары пружина 7.

Условие окончания 1-го этапа и начала 2-го этапа: $F_{a10}^{max} = F_{a7}^{min}$, где F_{a10}^{max} – сила, создаваемая пружинной 10 в крайнем положении, соответствующем соприкосновению фрикционных поверхностей, $F_{a10}^{max} = c_1 h_6$ (h_6 – наибольший ход диска 6; c_1 – жесткость пружины 10); F_{a7}^{min} – наименьшее усилие, создаваемое пружинной 7 (при упоре диска 5 в упор на полумуфте 3).

Так как $F_{a7}^{min} = F_{a7}$, поэтому $c_1 h_6 = F_{a7}$, откуда $h_6 = F_{a7} / c_1$.

Итак, первый этап окончится, если $y_I = h_6 = \frac{F_{a7}}{c_1}$.

По величине y_I нетрудно найти соответствующее значение x_I : $x_I = f(\psi_I)$.

Так, для окружности: $(x-b)^2 + (y-a)^2 = R^2$, имеем $x_I = b \pm \sqrt{R^2 - (y_I - a)^2}$;

для прямой: $y = \alpha \operatorname{tg} \gamma = (x - R_0) \operatorname{tg} \gamma$; $x_I = \frac{y_I}{\operatorname{tg} \gamma} + R_0$.

Поэтому решение уравнений движения на 1-ом этапе следует ограничить величиной x_I или $y_I = h_6$. Используя уравнения движения, следует найти T_∂ , ω_1 , $V_{\text{отн}}$, соответствующие этим значениям x_I или y_I .

Уравнения движения на 2-ом этапе:

$$\frac{dT_\partial}{dt} = \frac{1}{vT} - \frac{T_\partial}{T} - \frac{\omega_1}{v\omega_0 T}; \quad (1)$$

$$I_{np} \frac{d\omega_1}{dt} = T_\partial - T_f. \quad (2)$$

Составляя выражение для определения T_f , сопротивление во фрикционных дисках учтем следующим образом:

$$T_f = f_\phi z_{mp} N r_{cp},$$

где f_ϕ – коэффициент трения на фрикционных поверхностях и определяемый:

$$f_\phi = a' + \frac{f' - a'}{1 + b' V_{ск}},$$

где a', b', f' – опытные постоянные; $V_{ск}$ – скорость скольжения; z_{mp} – число поверхностей трения; N – осевая сила, действующая на фрикционный узел; r_{cp} – средний радиус поверхностей трения: $r_{cp} \approx 0,5 (r_{нар} + r_{вн})$, где $r_{нар}$, $r_{вн}$ – наружный и внутренний радиусы поверхностей трения.

Допуская равномерное распределение давления по фрикционным поверхностям, что соответствует абсолютно жестким нажимным дискам, средний радиус поверхностей трения можно определить как [2]:

$$r_{cp} = \frac{2}{3} \frac{(r_{нар}^3 - r_{вн}^3)}{(r_{нар}^2 - r_{вн}^2)}.$$

Осевую силу N найдем из следующих соображений. На диск 6 с одной стороны действует пружина 10, стремясь отодвинуть его вправо, а с другой – через диск 5 и шары 4 передается усилие пружины 7. Поэтому:

$$N = F_{a7} + c_2 h_5 - F_{a10}^{max},$$

где F_{a7} – наименьшая сила, создаваемая пружиной 7 (при упоре диска 5 в упор на полумуфте 3); c_2 – жесткость пружины 7; h_5 – осевое смещение диска 5 при перемещении шаров вверх; F_{a10}^{max} – наибольшая сила, создаваемая пружиной 10 (диск 6 прижал фрикционные поверхности к полумуфте 3).

Сила F_{a10}^{max} определяется как:

$$F_{a10}^{max} = c_1 y_I = c_1 h_6 = c_1 \frac{F_{a7}}{c_1} = F_{a7},$$

тогда: $N = c_2 h_5$, $T_f = f_\phi z_{mp} c_2 h_5 r_{cp}$.

Скорость скольжения: $V_{ск} = \omega_1 - \omega_2 r_{cp} = \omega_1 r_{cp}$.

При перемещении диска 5 будет преодолеваются трение в шлицах и трение по опорной поверхности диска 5 и ведомой полумуфты 3.

Используя приведенные зависимости можно получить момент сил сопротивления [3]:

$$T_f = \frac{1}{\omega_1} \left\{ k \left(F_{a7} + c_2 h_5 \right) \left[\omega_y + \omega_{uu} \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta} \right] \right\} + T' + \frac{f m_{uu} \varepsilon_1 r_0 r_{z_{uu}} \omega_{uu}}{\omega_1} + f_{\phi} z_{mp} c_2 h_5 r_{cp}, \quad (3)$$

где T' – зависит от варианта конструкции:

– для радиальных подшипников:

$$T' = c d^2 + 0,5 f' d \left(\sqrt{V F_r + 2 Y F_{a_n}} \right) k_{\delta} k_T,$$

где F_{a_n} – усилие, действующее в осевом направлении от пружины на подшипники,

$$F_{a_n} = F_{a7}^{\min} + c_2 h_5 = F_{a7} + c_2 h_5;$$

– для упорных подшипников:

$$T' = f G_5 r_2' + F_{a_n} \left(k \frac{D_0}{d_n} + \frac{3}{32} f k_3 \sqrt[3]{\frac{F_{a_n}}{z_1}} \right);$$

– для обычного упора:

$$T' = F_{a_n} \left(k \frac{D_0}{d_n} + \frac{3}{32} f k_3 \sqrt[3]{\frac{F_{a_n}}{z_1}} \right) + f G_5 r_2 + f F_{a_n} \frac{r_1 + r_2}{2}.$$

При инженерных расчетах формулу (3) можно упростить. Тогда имеем для первого варианта:

$$T_f = 0,5 f_R \left(G_5 + 2 m F_{a_n} \right) d + f_A' F_{a_n} x + f_{\phi} z_{mp} N r_{cp}, \quad (4)$$

для второго варианта:

$$T_f = f_A' x F_{a_n} + 0,5 f_A d F_{a_n} + f G_5 r_2' + f_{\phi} z_{mp} N r_{cp}, \quad (5)$$

для третьего варианта:

$$T_f = f_A' x F_{a_n} + 0,5 f_A d F_{a_n} + f G_5 r_2 + f_{\phi} z_{mp} N r_{cp} + f F_{a_n} r_{cp}. \quad (6)$$

Приведенный момент инерции определяется по тем же формулам, что и на 1-ом этапе [4]. Приближенные уравнения движения всего агрегата на 2-ом этапе имеют вид:

$$I_n \frac{d\omega_1}{dt} = T_{\partial} - T_f, \quad T_{\partial} = k_1 + k_2 \omega_1.$$

Величина T_f определяется по формулам (4, 5, 6). Считая $x \approx R_0$, что для приближенного решения приемлемо, запишем все три уравнения как одно, имея ввиду, что $F_{a_n} = F_{a7} + c_2 h_5$, а

$$T_f = \left(F_{a7} + c_2 h_5 \right) B_1 + B_2 + B_3 h_5, \quad (7)$$

где B_1, B_2, B_3 – коэффициенты, которые находятся путем сопоставления формулы (7) с формулами (4, 5, 6). Тогда

$$I_n \frac{d\omega_1}{dt} = k_1 + k_2 \omega_1 - F_{a7} B_1 - B_2 - h_5 \left(B_3 + c_2 B_1 \right).$$

Для составления уравнений относительного движения шара необходимо определить проекцию всех сил, действующих на диск 5, на его ось вращения: $z_{uu} N_2 \sin \beta - F_{a_n} + F_{uu} + F_{uu}' = 0$, где F_{uu} и F_{uu}' – силы сопротивления при осевом перемещении диска 5, которыми можно пренебречь.

Используя это уравнение, окончательно после преобразований имеем:

$$m_{uu} \frac{dV_{omn}}{dt} - \frac{m_{uu} b_1 V_{omn}^2}{\rho} - m_{uu} x b_2 \omega_c^2 + b_3 \left\{ \left(\varphi_{a_7} + c_2 h_5 \right) \frac{f}{r_{un}} \times \right. \\ \left. \times \left[k \left(\varphi_{a_7} + c_2 h_5 \right) \frac{\omega_{uu} \sin(\varphi + \beta)}{\omega_1 \sin \beta} + T' \right] - f^2 G_5 \right\} = 0,$$

где

$$b_1 = \frac{\cos \beta + f \sin \beta}{\sin \beta - f \cos \beta}; \quad b_2 = \sin \beta + b_1 \cos \beta; \quad b_3 = \frac{f + b_1}{z_{uu} \sin \beta};$$

Если шар в относительном перемещении совершает движение вверх по прямой, то $\rho = \infty$, и $m_{uu} \frac{b_1 V_{omn}^2}{\rho} = 0$, тогда

$$m_{uu} \ddot{x} - m_{uu} b_2 x \omega_c^2 + b_3 \left\{ \left(\varphi_{a_7} + c_2 h_5 \right) \frac{f}{r_{un}} \times \left[k \left(\varphi_{a_7} + c_2 h_5 \right) \frac{\omega_{uu} \sin(\varphi + \beta)}{\omega_1 \sin \beta} + T' \right] - f^2 G_5 \right\} = 0.$$

При приближенном решении это уравнение упрощается:

$$m_{uu} \ddot{x} - m_{uu} b_2 x \left(\frac{x + r \cos \beta}{2x + r \cos \beta} \right)^2 \omega_1^2 + b_3 \left(\varphi_{a_7} + c_2 h_5 \right) = 0.$$

Решить полученные уравнения можно, если известно уравнение профиля. Пусть уравнение профиля диска 5 задано в виде окружности или в виде прямой. Тогда для прямой [5] имеем:

$$\sin \gamma = \cos \beta = \text{const}, \quad \cos \gamma = \sin \beta = \text{const}, \\ b_1 = \frac{\cos \beta + f \sin \beta}{\sin \beta - f \cos \beta} = \text{const}, \quad b_2 = \sin \beta + b_1 \cos \beta = \text{const}, \quad b_3 = \frac{f + b_1}{z_{uu} \sin \beta} = \text{const}, \\ y = \left(-R_0 \right) \text{tg} \gamma = \frac{x - R_0}{\text{tg} \beta} = \left(-R_0 \right) \text{ctg} \beta, \quad h_5 = y + r \cos \gamma - r.$$

С учетом этих соотношений получим:

$$I_n \frac{d\omega_1}{dt} - k_2 \omega_1 + D'_1 x - D'_2 = 0, \tag{8}$$

$$m_{uu} \ddot{x} - m_{uu} b_2 x \left(\frac{x + r \cos \beta}{2x + r \cos \beta} \right)^2 \omega_1^2 + D'_3 x + D'_4 = 0, \tag{9}$$

где $D'_1 = D_1 \text{tg} \gamma$, $D'_2 = D_2 + D'_1 R_0$, $D'_3 = D_3 \text{tg} \gamma$, $D'_4 = D_4 - D'_3 R_0$, $D_1 = B_3 + c_2 B_1$, $D_2 = k_1 - F_{a_7} B_1 - B_2 - \left(\cos \gamma - r \right) B_3 + c_2 B_1$, $D_3 = b_3 c_2$, $D_4 = b_3 \left(\varphi_{a_7} + c_2 r \cos \gamma - c_2 r \right)$.

Уравнения (8) и (9) можно решить только численным методом. Попробуем внести ещё некоторые упрощения. Из физического смысла ясно, что x на 2-ом этапе меняется незначительно и лежит в пределах: $x_1 \leq x \leq x_{II}$, где x_1 – координата центра тяжести шара в конце 1-го этапа; x_{II} – координата центра тяжести шара в конце 2-го этапа (величина x_{II} будет вычислена после решения уравнений движения на 2-ом этапе).

Поскольку x меняется незначительно, можно принять:

$$x = x_{cp} = \frac{x_1 + x_{II}}{2}.$$

Уравнение (8) примет вид:

$$I_n \frac{d\omega_1}{dt} - k_2 \omega_1 + D'_1 x_{cp} - D'_2 = 0.$$

Обозначим $D'_1 x_{cp} - D'_2 = S$. Тогда $I_n \frac{d\omega_1}{dt} = k_2 \omega_1 - S$.

Продолжительность периода t_2 определяется зависимостью:

$$\frac{I_n}{k_2} \ln \frac{k_2 \omega_1 - S}{k_2 \omega_I - S} = t,$$

откуда с учетом начальных условий $t = 0, \omega_1 = \omega_I$, получим

$$\omega_1 = \frac{1}{k_2} \left\{ \left(k_2 \omega_I - S \right) e^{\frac{k_2 t}{I_n}} + S \right\}. \quad (10)$$

Решение уравнения (12) имеет вид:

$$x = \frac{b_2 x_{cp} L^2}{k_2^2} \left(a_1 e^{\frac{2k_2 t}{I_n}} + a_2 e^{\frac{k_2 t}{I_n}} + 0,5 S^2 t - a_1 - a_2 - a_4 t - a_5 t \right) - a_3 t^2 + \dot{x}_I t + x_I, \quad (11)$$

где

$$a_1 = \frac{\left(k_2 \omega_I - S \right)^2 I_n^2}{4 k_2^2}; \quad a_2 = 2 S \frac{\left(k_2 \omega_I - S \right) I_n}{k_2^2}; \quad a_3 = \frac{\left(6' x_{cp} - D_4' \right)}{2 m_{ш}};$$

$$a_4 = \frac{\left(k_2 \omega_I - S \right) \dot{I}_n}{2 k_2}; \quad a_5 = 2 S \frac{\left(k_2 \omega_I - S \right) \dot{I}_n}{k_2}; \quad L = \frac{x_{cp} + r \cos \beta}{2 x_{cp} + r \cos \beta};$$

Решение уравнений (10), (11) можно использовать и для профилирования упорного диска по окружности. В этом случае дугу окружности следует аппроксимировать прямой линией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авторское свидетельство 418645 (СССР). Центробежная пусковая муфта / Авт. изобрет. Б.Г. Кобцев, В.Н. Коськин. – Заявл. 31.01.72, № 1741625/25 – 27, опубл. 05.03.74.
2. Дмитриев В.А. Детали машин. – Л.: Судостроение, 1970. – 792с.
3. Корнеева Е.Н., Кобцев Б.Г., Корнеев Ю.С. Влияние силовых факторов на работу механической пусковой муфты. М.: Вестник машиностроения, № 6, 2008. - С. 11-14.
4. Корнеева Е.Н., Гордон В.А. Динамика безнагрузочного разгона механической пусковой муфты, применяемой в приводах транспортных машин. Орел: Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». - № 1/17 (542) 2008.- С. 75-84.
5. Корнеев Ю.С., Гордон В.А., Корнеева Е.Н. и др. Профилирование упорного диска пускозащитной муфты. Орел: Мир транспорта и технологических машин, № 2/25 (557) 2009.- С. 69-73.

Корнеева Елена Николаевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, старший преподаватель
Тел.: 41-98-48

Корнеев Юрий Степанович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: 41-98-96

А.Б. МУСТАФАЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТОМ ЦИЛИНДРЕ

Дается математическое описание расчетной модели о зарождении трещины в изотропном толстостенном цилиндре в условиях плоской деформации. Решение задачи о равновесии цилиндра с полосами предразрушения в условиях неравномерного температурного поля сводится к решению системы сингулярных интегральных уравнений с ядрами типа Коши. Условие появления трещины формулируется с учетом критерия предельного раскрытия берегов зон предразрушения.

Ключевые слова: *неравномерно нагретый цилиндр, зоны предразрушения, зарождение трещины.*

The mathematical model of crack nucleation in a isotropic thick-walled cylinder under the condition of plane deformation is constructed. The problem of the equilibrium of the cylinder with pre-fracture zones reduces to solving of system singular integral equations with a Cauchy-type kernel. The condition for the appearance of a crack formulated, taking account of the criterion of the limit opening of the pre-fracture zones faces.

Keywords: *non-uniformly heated the cylinder, prefracture zones, nucleation of crack.*

Пусть поперечное сечение рассматриваемого цилиндра заполняет в плоскости $z = x + iy$ область S , ограниченную извне окружностью радиуса R_1 , а изнутри окружностью радиуса R . Рассмотрим напряженно-деформированное состояние в кольцевой области S при неравномерном температурном поле. Считается, что распределение температуры $T(\zeta, \theta)$ известно из решения задачи теории теплопроводности. Полагаем, что имеет место состояние плоской деформации.

Принято, что в материале металлического толстостенного цилиндра имеется концентратор напряжений (зоны ослабленных межчастичных связей материала). При нагружении цилиндра тепловой нагрузкой в них (прослойки перенапряженного материала) образуется область пластического течения. Через некоторое число циклов теплового нагружения возможность пластического деформирования в зонах ослабленных межчастичных связей материала исчерпывается, и раскрытие берегов полосы пластического течения резко возрастает. Если раскрытие берегов зоны предразрушения (область ослабленных межчастичных связей материала) в точке максимальной концентрации достигает предельного значения δ_c для данного материала цилиндра, то в этой точке зарождается [1] усталостная трещина.

Взаимодействие берегов зоны предразрушения моделируется [1] путем введения между ее берегами линий пластического скольжения (вырожденных полос пластических деформаций). Считается, что при действии тепловой нагрузки взаимодействие между поверхностями в зонах предразрушения характеризуется постоянными нормальными σ_T и касательными τ_T напряжениями сцепления материала. Такое предположение позволяет моделировать пластическое течение в зонах предразрушения материала. Физическая природа таких связей и размеры области предразрушения, в которых осуществляется взаимодействие берегов областей межчастичных связей, зависит от вида материала [2, 3].

В рассматриваемом случае возникновение трещины в сечении цилиндра представляет собой процесс перехода зоны предразрушения в область разорванных связей между поверхностями материала цилиндра. Размеры зон предразрушения заранее неизвестны и подлежат определению при решении рассматриваемой задачи.

Цилиндр моделируем изотропным однородным телом. Твердое тело (цилиндр), деформируемое за пределом упругости, представляется как тело, деформируемое упруго всюду, кроме некоторых поверхностей (полос предразрушения). Напомним, что упругая деформация представляет собой изменение в расстояниях между элементарными частицами без изменения порядка их расположения, в то время как пластическая деформация сопровождается изменением относительного расположения атомов за счет сдвигов одного слоя атомов относительно другого (элементарные пластические деформации).

В центрах зон предразрушения разместим начало локальных систем координат $x_k O_k y_k$, оси x_k которых совпадают с линией пластических деформаций и образует угол α_k с осью x $\theta = 0$.

Пусть на границе кольцевой области S отсутствует внешняя нагрузка

$$\sigma_r - i\tau_{r\theta} = 0 \quad \text{при } |z| = R \tag{1}$$

$$\sigma_r - i\tau_{r\theta} = 0 \quad \text{при } |z| = R_1,$$

где $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ - компоненты тензора напряжений.

Краевые условия на берегах полос предразрушения будут

$$\sigma_{y_k} - i\tau_{x_k y_k} = \sigma_T - i\tau_T \quad \text{при } y_k = 0, |x_k| \leq \ell_k \quad (k = 1, 2, \dots, N), \tag{2}$$

где ℓ_k - полудлина полосы предразрушения, подлежит определению.

Решение краевой задачи термоупругости (1) – (2) ищем в виде суммы

$$\sigma_x = \bar{\sigma}_x + \bar{\bar{\sigma}}_x; \quad \sigma_y = \bar{\sigma}_y + \bar{\bar{\sigma}}_y; \quad \tau_{xy} = \bar{\tau}_{xy} + \bar{\bar{\tau}}_{xy}, \tag{3}$$

где $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\tau}_{xy}$ - решение задачи термоупругости для кольцевой области S без зон предразрушения.

Для определения $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\tau}_{xy}$ используем [4] термоупругий потенциал перемещений $F(\zeta, \theta)$

$$\Delta F(\zeta, \theta) = \beta T(\zeta, \theta), \quad \beta = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha, \tag{4}$$

где ν – коэффициент Пуассона материала цилиндра; α – коэффициент линейного температурного расширения.

После решения дифференциального уравнения (4) методом разделения переменных, находим компоненты $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\tau}_{xy}$ по известным формулам [4]:

$$\bar{\sigma}_x = -2\mu \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}; \quad \bar{\sigma}_y = -2\mu \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}; \quad \bar{\tau}_{xy} = 2\mu \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}, \tag{5}$$

где μ – модуль сдвига материала цилиндра.

Для определения компонент тензора напряжений $\bar{\bar{\sigma}}_x, \bar{\bar{\sigma}}_y, \bar{\bar{\tau}}_{xy}$ имеем следующие граничные условия

$$\bar{\bar{\sigma}}_r - i\bar{\bar{\tau}}_{r\theta} = -\bar{\sigma}_r - i\bar{\tau}_{r\theta} \quad \text{при } |z| = R \tag{6}$$

$$\bar{\bar{\sigma}}_r - i\bar{\bar{\tau}}_{r\theta} = -\bar{\sigma}_r - i\bar{\tau}_{r\theta} \quad \text{при } |z| = R_1$$

$$\bar{\bar{\sigma}}_{y_k} - \bar{\bar{\tau}}_{x_k y_k} = \sigma_T - i\tau_T - \bar{\sigma}_{y_k} - \bar{\tau}_{x_k y_k} \quad \text{при } y_k = 0, |x_k| \leq \ell_k \tag{7}$$

$(k = 1, 2, \dots, N)$

Для решения краевой задачи (6) – (7) применяем метод Н.И. Мусхелишвили [5]. Используя формулы Колосова-Мусхелишвили, краевые условия (6) – (7) запишем в следующем виде

$$\text{при } r = R \quad \Phi(\zeta) \bar{\Phi}(\bar{\zeta}) e^{2i\theta} [\Phi'(\zeta) \Psi(\bar{\zeta})] = -\bar{\sigma}_r - i\bar{\tau}_{r\theta} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} &\text{при } r = R_1 \quad \Phi(z) \overline{\Phi(z)} e^{2i\theta} [\Phi'(z) \Psi(z)] = \sigma_r - i\bar{\tau}_{r\theta} \\ &\text{при } y_k = 0, |t_k| \leq \ell_k \quad \Phi(z_k) \overline{\Phi(z_k)} \bar{t}_k \Phi'(z_k) \Psi(z_k) = \\ &= \sigma_T + i\tau_T - \sigma_{y_k} + i\bar{\tau}_{x_k y_k} \quad (k = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (9)$$

Комплексные потенциалы $\Phi(z)$ и $\Psi(z)$, описывающие напряженно-деформированное состояние в кольцевой области S , ищем в следующем виде

$$\Phi(z) = \Phi_0(z) + \Phi_1(z) + \Phi_2(z); \quad (10)$$

$$\Psi(z) = \Psi_0(z) + \Psi_1(z) + \Psi_2(z),$$

$$\text{где } \Phi_0(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k z^k; \quad \Psi_0(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k z^k; \quad (11)$$

$$\Phi_1(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \frac{g_k(t) dt}{t - z_k}; \quad (12)$$

$$\Psi_1(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N e^{-2i\alpha_k} \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \left[\frac{g_k(t)}{t - z_k} - \frac{\bar{T}_k e^{i\alpha_k}}{t - \bar{z}_k} g_k(t) \right] dt;$$

$$T_k = t e^{i\alpha_k} + z_k^0; \quad z_k^0 = x_k^0 + iy_k^0; \quad \bar{z}_k = e^{-i\alpha_k} \bar{z}_k^0$$

Здесь $g_k(z_k)$ – искомые функции, характеризующие раскрытие берегов полос предразрушения

$$g_k(z_k) = \frac{2\mu}{i(\kappa_0 + 1)} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[u_k^+(z_k, 0) - u_k^-(z_k, 0) + i \left(v_k^+(z_k, 0) - v_k^-(z_k, 0) \right) \right] \quad (k = 1, 2, \dots, N)$$

Неизвестные искомые функции $g_k(z_k)$ и комплексные потенциалы $\Phi_2(z)$ и $\Psi_2(z)$ должны быть определены из краевых условий на берегах полос предразрушения и на контуре $r = R_1$. После некоторых преобразований и вычислений соответствующих интегралов, находим

$$\Phi_2(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \left\{ \left(\frac{1}{zT_k - 1} + \frac{1}{2} \right) \bar{T}_k e^{i\alpha_k} g_k(t) + \right. \quad (13)$$

$$\left. + \left[\frac{T_k}{2} - \frac{z^2 \bar{T}_k - 2z + T_k}{\bar{T}_k - 1} \right] e^{-i\alpha_k} g_k(t) \right\} dt;$$

$$\begin{aligned} \Psi_2(z) = &\frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \left[\frac{e^{i\alpha_k} \bar{T}_k^3}{\bar{T}_k - 1} g_k(t) + \left(\bar{T}_k^2 + 4 - 3z\bar{T}_k + zT_k\bar{T}_k^2 - 3T_k\bar{T}_k \right) \right. \\ &\left. \times \frac{\bar{T}_k e^{-i\alpha_k}}{\bar{T}_k - 1} g_k(t) \right] dt \end{aligned}$$

Краевые условия (8) задачи можно записать для отыскания комплексных потенциалов $\Phi_0(z)$ и $\Psi_0(z)$ в следующем виде

$$\Phi_0(z) \overline{\Phi_0(z)} e^{2i\theta} [\Phi_0'(z) \Psi_0(z)] = \sigma_r - i\tau_{r\theta} \quad \text{при } \tau = R e^{i\theta} \quad (14)$$

$$\Phi_0(z_1) \overline{\Phi_0(z_1)} e^{2i\theta} [\Phi_0'(z_1) \Psi_0(z_1)] = \sigma_r - i\bar{\tau}_{r\theta} \quad \text{при } \tau_1 = R_1 e^{i\theta}$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } f_1^* \left(\zeta \right) - if_2^* \left(\zeta \right) &= \Phi_* \left(\zeta \right) - \overline{\Phi_* \left(\zeta \right)} e^{2i\theta} \left[\Phi_*' \left(\zeta \right) \right] \Psi_* \left(\zeta \right), \\ \Phi_* \left(\zeta \right) &= \Phi_1 \left(\zeta \right) + \Phi_2 \left(\zeta \right); \quad \Psi_* \left(\zeta \right) = \Psi_1 \left(\zeta \right) + \Psi_2 \left(\zeta \right) \end{aligned}$$

Решение краевой задачи (14) достигается методом степенных рядов [5]. Для этого необходимо разложить правые части граничных условий (14) в ряды Фурье. Эти разложения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} f_1^* \left(\zeta \right) - if_2^* \left(\zeta \right) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k^* e^{ik\theta} \\ - \left(\zeta_r - i\bar{\tau}_{r\theta} \right) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k e^{ik\theta} \quad \text{при } r = R \\ - \left(\zeta_r - i\bar{\tau}_{r\theta} \right) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k e^{ik\theta} \quad r = R_1, \end{aligned}$$

где $A_k^* = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(f_1^* \left(\zeta \right) - if_2^* \left(\zeta \right) \right) e^{-ik\theta} d\theta \quad \zeta = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

$$A_k = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\zeta_r - i\bar{\tau}_{r\theta} \right) e^{-ik\theta} d\theta, \quad B_k = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\zeta_r - i\bar{\tau}_{r\theta} \right) e^{-ik\theta} d\theta$$

Ввиду некоторой громоздкости коэффициенты разложения в явном виде не приводятся.

Удовлетворяя комплексным потенциалам (11) краевым условиям (14) после некоторых преобразований, получаем систему линейных алгебраических уравнений относительно искомых коэффициентов a_k, b_k :

$$\begin{aligned} a_0 + \bar{a}_0 - b_{-2} R_0^{-2} &= A_0 - A_0^*; \\ a_0 + \bar{a}_0 - b_{-2} R^{-2} &= B_0 \quad (15) \\ (-k) \bar{g}_k R_0^k + \bar{a}_{-k} R_0^{-k} - b_{k-2} R_0^{k-2} &= A_k - A_k^* \\ (-k) \bar{g}_k R^k + \bar{a}_{-k} R^{-k} - b_{k-2} R^{k-2} &= B_k \end{aligned}$$

Решение бесконечной линейной системы (15) не представляет трудностей и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{B_0 R_1^2 - (A_0 - A_0^*) R^2}{2(R^2 - R_0^2)}; \quad a_{-1} = \frac{(A_1 - A_1^*) R}{1 + \kappa_0}; \quad \kappa_0 = 3 - 4\nu \\ b_{-1} &= -\frac{\kappa_0 (A_1 - A_1^*) R}{1 + \kappa_0}; \quad a_1 = \frac{\bar{M}_{-1}}{R_1^4 - R^4} - \frac{2(A_1 - A_1^*) R}{(1 + \kappa_0)(R_1^2 + R^2)} \quad (16) \\ a_k &= \frac{(+k) (R_1^2 - R^2) \bar{M}_k - (R_1^{-2k+2} - R^{-2k+2}) \bar{M}_{-k}}{(-k^2) (R_1^2 - R^2) - (R_1^{2k+2} - R^{2k+2}) (R_1^{-2k+2} - R^{-2k+2})}; \quad \zeta = \pm 2, \pm 3, \dots \\ M_k &= B_k R_1^{-k+2} - (A_k - A_k^*) R_1^{-k+2}; \quad b_{-2} R^{-2} = 2a_0 - A_0 + A_0^* \\ b_{k-2} R_1^{k-2} &= (-k) \bar{g}_k R_1^k + \bar{a}_{-k} R_1^{-k} - B_k \end{aligned}$$

Удовлетворяя функциями (10) – (13) краевым условиям на берегах полос предразрушения, получим систему комплексных сингулярных интегральных уравнений относительно неизвестных функций $g_k \left(\zeta \right)$:

$$\sum_{k=1}^N \int_{-\ell_k}^{\ell_k} [R_{nk}(x)g_k(x) + S_{nk}(x)g_k(x)] dt = \pi f(x) \quad (17)$$

Здесь $f(x) = \sigma_T - i\tau_T + f_0(x)$

$$f_0(x) = -\Phi_0(x) + \overline{\Phi_0(x)} + x\overline{\Phi_0'(x)} + \overline{\Psi_0(x)} - \Phi_{y_k} - i\overline{\tau_{x_k y_k}}$$

$$R_{nk}(x) = \frac{e^{i\alpha_k}}{2} \left(\frac{1}{T_k - X_n} + \frac{e^{-2i\alpha_n}}{\overline{T_k - X_n}} \right) - \frac{e^{i\alpha_k}}{2} \left(\frac{X_n \overline{T_k^2}}{1 - X_n \overline{T_k}} + \frac{\overline{X_k^2 T_k - 2\overline{X_n} + \overline{T_k}}}{(-T_k \overline{X_n})} \right) + e^{-2i\alpha_n} \left(\frac{2X_n \overline{T_k} - 1 + \overline{T_k^2} (\overline{X_n} + \overline{T_k}) (\overline{X_n T_k} - 3) + 4\overline{T_k}}{(-T_k \overline{X_n})} \right) \quad (18)$$

$$S_{nk}(x) = \frac{e^{-i\alpha_k}}{2} \left[\frac{1}{\overline{T_k - X_n}} - \frac{T_k - X_n}{(x - X_n)^2} e^{-2i\alpha_n} \right] - \frac{e^{-i\alpha_k}}{2} \left[\frac{T_k^2 X_n}{1 - T_k \overline{X_n}} + \frac{X_n^2 \overline{T_k} - 2X_n + T_k}{(-T_k \overline{X_n})} + \frac{T_k^2 (\overline{X_n} - T_k) e^{-2i\alpha_n}}{(-T_k \overline{X_n})} \right]$$

$$X_n = x_n e^{-i\alpha_n} + z_n^0$$

Для внутренних полос предразрушения к системе сингулярных интегральных уравнений необходимо добавить дополнительные условия

$$\int_{-\ell_k}^{\ell_k} g_k(x) dx = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, N), \quad (19)$$

обеспечивающие однозначность смещений при обходе контуров полос предразрушения.

Используя замену переменных, перейдем к безразмерным переменным в интегральных уравнениях (17).

Решение системы интегральных уравнений (17) представим в виде [6, 7]:

$$g_k(x) = \frac{\varphi_{0k}(\eta)}{\sqrt{1-\eta^2}} \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (20)$$

Применяя процедуру алгебраизации [6, 7] к сингулярному интегральному уравнению (17) и дополнительному условию (19), получим систему $N \times M$ алгебраических уравнений для определения $N \times M$ неизвестных $g_k(x) = v_k(x) - iu_k(x)$:

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^N \ell_k [\varphi_{0k}(t_m) R_{nk}(t_m, \ell_n x_r) + \overline{\varphi_{0k}(t_m)} S_{nk}(t_m, \ell_n x_r)] = f_n(x_r)$$

$$\sum_{m=1}^M \varphi_{0n}(t_m) = 0 \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad r = 1, 2, \dots, M-1 \quad (21)$$

$$\text{Здесь } t_m = \cos \frac{2m-1}{2M} \pi \quad (m = 1, 2, \dots, M)$$

$$x_r = \cos \frac{\pi r}{M} \quad (r = 1, 2, \dots, M-1)$$

Если в системе (21) перейти к комплексно сопряженным значениям, получим еще $N \times M$ алгебраических уравнений.

Так как напряжения в цилиндре всюду ограничены, то решение системы сингулярных интегральных уравнений следовало бы искать в классе всюду ограниченных функций.

Следовательно, необходимо к системе уравнений (21) добавить условия конечности напряжений в окрестности концов полос предразрушения.

Записывая эти условия

$$\sum_{m=1}^M \varphi_{0k} \operatorname{ctg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0; \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (22)$$

$$\sum_{m=1}^M \varphi_{0k} \operatorname{tg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0,$$

получим конечную комплексную алгебраическую систему (21), (22) для определения $N \times M$ неизвестных φ_{0k} ($k = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, M$) и размеров полос предразрушения.

Из-за неизвестных размеров ℓ_k длины полос предразрушения алгебраическая система (21), (22) оказалась нелинейной. Для решения полученных алгебраических систем (21), (22) использовали метод последовательных приближений. Для определения предельного равновесия полос предразрушения в цилиндре используем критерий критического раскрытия берегов полос предразрушения.

Принимаем, что разрыв межчастичных связей материала на берегах полос предразрушения (при $x_k = x_0$) происходит при выполнении условия

$$\sqrt{\psi_k^+(x_0, 0) - \psi_k^-(x_0, 0)} + \sqrt{\varphi_k^+(x_0, 0) - \varphi_k^-(x_0, 0)} = \delta_c, \quad (23)$$

где параметр δ_c является характеристикой сопротивления материала цилиндра трещинообразованию, определяется опытным путем.

Используя решения задачи о равновесии полос предразрушения в цилиндре, вычислим смещения на берегах полос предразрушения

$$v_k^*(x_{0k}, 0) - iu_k^*(x_{0k}, 0) = -\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M} \sum_{m=1}^{M_{1k}} g_k(t_m), \quad (24)$$

где $v_k^*(x_{0k}, 0) = v_k^+(x_{0k}, 0) - v_k^-(x_{0k}, 0)$; $u_k^*(x_{0k}, 0) = u_k^+(x_{0k}, 0) - u_k^-(x_{0k}, 0)$; M_{1k} – число узловых точек, принадлежащих отрезку $[\ell_k, x_{0k}]$.

Очевидно, что разрыв межчастичных связей материала будет происходить в средней части полос предразрушения, т.е. $M_{1k} = \frac{1}{2} M$.

Из соотношения (24) отделяя действительную и мнимую части и вычисляя модуль вектора перемещений V_{1k} на берегах полосы предразрушения при $x = x_{0k}$, получим

$$V_{1k} = \frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \cdot \frac{\pi \ell_k}{M} \sqrt{C_{1k}^2 + C_{2k}^2},$$

где $C_{1k} = \sum_{m=1}^{M_{1k}} v_k(t_m)$; $C_{2k} = \sum_{m=1}^{M_{1k}} u_k(t_m)$

Таким образом, условием, определяющим предельное значение внешней нагрузки, при котором происходит появление трещины, будет

$$\frac{1 + \kappa_0}{2G} \cdot \frac{\pi \ell_k}{M} \sqrt{C_{1k}^2 + C_{2k}^2} = \delta_c. \quad (25)$$

Совместное решение уравнений (16), (20), (213) и (25) позволяет при заданных характеристиках толстостенного цилиндра определить критическую величину тепловой нагрузки и размеры полос предразрушения ℓ_k^c для состояния предельного равновесия.

Меняя значения параметров α_k и z_k^0 можно исследовать различные случаи расположения зон предразрушения в материале цилиндра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирсалимов, В.М. Зарождение дефекта типа трещины во втулке контактной пары / В.М. Мирсалимов // Математическое моделирование. 2005. – Т. 17. – №2. – С. 35 – 45.
2. Панасюк, В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В.В. Панасюк. – Киев: Наукова думка, 1991. – 416 с.
3. Матвиенко, Ю.Г. Физика и механика разрушения твердых тел / Ю.Г. Матвиенко. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 74 с.
4. Мелан, Э. Термоупругие напряжения, вызываемые стационарными температурными полями / Э. Мелан, Г. Паркус. – М.: Физматлит, 1958. – 167 с.
5. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
6. Каландия, А.И. Математические методы двумерной упругости / А.И. Каландия. – М.: Наука, 1973. – 304 с.
7. Мирсалимов, В.М. Неоднородные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов. – М.: Наука, 1987. – 256 с.

Мустафаев Азер Байрам оглы

Азербайджан, г. Баку, Институт математики и механики НАН Азербайджана,
аспирант
тел. (+99450) 319-93-35
E-mail: irakon63@hotmail.com

УДК 539.3

Л. Ю. ФРОЛЕНКОВА

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГИИ АДГЕЗИИ С УЧЕТОМ ТРОЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ СРЕДЫ

Для количественной оценки энергии адгезии однородных изотропных материалов предложен метод расчета, учитывающий потенциальное и кинетическое взаимодействие частей среды. При рассмотрении потенциального взаимодействия учитывалось не только парное, но и тройное взаимное влияние частиц. Это дало возможность выразить параметры потенциала через значения модулей Юнга и сдвига. При учете кинетического взаимодействия рассматривалось влияние давления фоновго газа, а также, в случае металлов, давление электронного газа.

Ключевые слова: адгезия, градиентная модель упругой среды, поверхностная энергия, энергия адгезии, потенциал двойного и тройного взаимодействий.

The method of calculation was offered for a quantitative assessment of adhesive energy of homogeneous isotropic materials, which considered potential and kinetic interaction of parts of environment. By consideration of potential interaction it was considered not only pair, but also triple interference of particles. It has given the possibility to express potential parameters through values of modulus of elasticity and modulus of rigidity. At the account of kinetic interaction influence pressure phonon gas, and also, in case of metals, pressure of electronic gas was considered.

Key words: adhesion, gradient model of an elastic medium, surface energy, energy of adhesion, potential of dual and triple interactions.

ВВЕДЕНИЕ

Теоретический расчет энергии адгезии твердых тел из реальных материалов и сплавов и влияния на прочность соединения высокочастотных волн, порожденных, например, нейтронной бомбардировкой, является актуальным, по крайней мере, в ядерной энергетике. Вместе с тем реализация его существующими методами теоретической физики [1, 2] невозможна из-за трудности учета в их рамках сложности химического состава используемых материалов.

В работе предлагается модель сплошной линейной упругой изотропной среды, позволяющая произвести необходимые расчеты и вместе с тем достаточно полно отражающая физические особенности, сопровождающие адгезию твердых тел – концентрацию избытка свободной энергии вблизи адгезионного шва, свободной поверхности.

ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Изучаемая сплошная среда B предполагается однородной и изотропной. Происходящие в ней процессы являются изотермическими, обратимыми. Плотность материала ρ является постоянной.

Среда считается упругой. Потенциал $d\Psi$ произвольной частицы dB пропорционален ее объему dV :

$$d\Psi = wdV. \quad (1)$$

с коэффициентом пропорциональности (далее потенциал), определяемым [3] взаимодействием с каждой из других частиц dB_1 и с каждой парой других частиц dB_1 и dB_2 , составляющих среду B (парное и тройное взаимодействие)

$$w = \frac{1}{2!} \int_V \Phi^{(2)}(\vec{R}_1 - \vec{R}) dV_1 + \frac{1}{3!} \int_V \left(\int_V \Phi^{(3)}(\vec{R}_1 - \vec{R}, |\vec{R}_2 - \vec{R}|) dV_2 \right) dV_1. \quad (2)$$

Варьирование поля перемещений частиц dB относительно текущего состояния приводит к выражению

$$\delta w = \int_V \bar{F}_1^{(2)} \circ \delta \langle \bar{u}_1 \rangle dV_1 + \int_V dV_2 \int_V \langle \bar{F}_1^{(3)} \circ \delta \langle \bar{u}_1 \rangle \rangle \bar{F}_2^{(3)} \circ \delta \langle \bar{u}_2 \rangle dV_1, \quad (3)$$

где $\bar{u} = \bar{R} - \bar{r}$ – смещение частицы из начального положения \bar{r} в текущее положение \bar{R} ; (\circ) – знак свертки перемножаемых тензоров, количество знаков (\circ) равно кратности свертки.

Для сил: $\bar{F}_1^{(2)} = -\frac{d\Phi^{(2)}}{d\bar{a}}$, $\bar{F}_j^{(3)} = -\frac{\partial\Phi^{(3)}}{\partial\bar{a}_j}$, где $j = 1, 2$, справедливы выражения:

$$\bar{F}_1^{(2)} \langle \bar{u}_1 + \Delta\bar{u}_1 \rangle = \bar{F}_1^{(2)} \langle \bar{u}_1 \rangle + \Delta\bar{u}_1 \circ \frac{d\bar{F}_1^{(2)}}{d\bar{a}_1}, \quad (4)$$

$$\bar{F}_j^{(3)} \langle \bar{u}_1 + \Delta\bar{u}_1, \bar{a}_2 + \Delta\bar{u}_2 \rangle = \bar{F}_j^{(3)} \langle \bar{u}_1, \bar{a}_2 \rangle + \Delta\bar{u}_1 \circ \frac{\partial\bar{F}_j^{(3)}}{\partial\bar{a}_1} + \Delta\bar{u}_2 \circ \frac{\partial\bar{F}_j^{(3)}}{\partial\bar{a}_2}. \quad (5)$$

где $\bar{a}_j = \bar{r}_j - \bar{r}$, \bar{r}_j , \bar{r} – радиус-векторы частиц dB_j относительно dB в отсчетном состоянии. Разницей объемов частиц в текущем и отсчетном состоянии можно пренебречь. (Отсчетным считается состояние среды в ее глубине в отсутствии внешних воздействий, где влияние границ отсутствует.)

Учет выше изложенных допущений приводит выражение (3) к виду:

$$\delta w = \sum_{m=1}^{\infty} P^{(m)} \circ \dots \circ \delta \langle \bar{u}^m \rangle, \quad (6)$$

где

$$P^{(m)} = P^{0(m)} + \sum_{n=1}^{\infty} \langle \bar{u}^m \rangle \dots \circ C^{(n,m)}; \quad (7)$$

$$P^{0(m)} = \frac{1}{2!} \int_V \frac{d\Phi^{(2)}}{d\bar{a}_1} \bar{a}_1^m dV_1 + \frac{2}{3!} \int_V dV_2 \int_V \frac{\partial\Phi^{(3)}}{\partial\bar{a}_1} \bar{a}_1^m dV_1; \quad (8)$$

$$C^{(n,m)} = \frac{1}{2!2!} \int_V \left(\bar{a}_1^n \frac{d^2\Phi^{(2)}}{d\bar{a}_1^2} \bar{a}_1^m \right) dV_1 + \frac{1}{3!2!2!} \int_V dV_2 \int_V \left(\bar{a}_1^n \frac{\partial^2\Phi^{(3)}}{\partial\bar{a}_1^2} \bar{a}_1^m \right) dV_1 + \frac{1}{3!2!2!} \int_V dV_2 \int_V \left(\bar{a}_1^n \frac{\partial^2\Phi^{(3)}}{\partial\bar{a}_1\partial\bar{a}_2} \bar{a}_2^m \right) dV_1; \quad (9)$$

$\nabla^m \bar{u} = \frac{d^m \bar{u}}{d\bar{r}^m}$ – градиент порядка m вектора \bar{u} ; ∇ – оператор Гамильтона; $P^{0(m)}$ – тензор

начальных напряжений; $C^{(n,m)}$ – тензор, характеризующий механические свойства среды.

Видно, что как $P^{0(m)}$, так и $C^{(n,m)}$ зависят от формы границ исследуемого тела.

Смещения $\Delta\bar{u}_1$, $\Delta\bar{u}_2$ частиц dV_1 , dV_2 относительно частицы dV предполагаются настолько малыми, что сходится ряд Тейлора

$$\Delta\bar{u}_j = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m!} \langle \bar{u}^m \rangle \dots \circ \bar{a}_j^m, \quad (10)$$

где \vec{a}^m – внешняя m -ная степень вектора \vec{a} ; $m = 1, 2, \dots, \infty$.

Прочность адгезионного соединения элементов, например, сложного композита, оценивается энергией адгезии f_a – изменением свободной энергии контактирующих тел B_1 и B_2 под единицей площади их контакта по отношению к состоянию в отсутствии адгезии в изотермическом обратимом процессе. Расчет производится по формуле [4].

$$f_a = W_{1,2} - \overleftarrow{W}_1 + \overleftarrow{W}_2, \quad (11)$$

где $W_{1,2}$, $\overleftarrow{W}_1 + \overleftarrow{W}_2$ – поверхностные энергии (энергии, сосредоточенные под единицей площади поверхности контакта S_a) системы $B_1 \cup B_2$ после адгезии и до нее соответственно. Поэтому необходим учет изменения полной свободной энергии твердых тел, а не только ее потенциальной части. Полная свободная энергия оценивается для реальных металлов формулой [5]

$$F = W + W_e + W_f, \quad (12)$$

где W – потенциальная энергия; W_e – кинетическая энергия электронов; W_f – кинетическая энергия фононов. Для полупроводников и диэлектриков W_e равна нулю.

За счет последних двух слагаемых в среде создается дополнительное гидростатическое давление, оцениваемое формулами

$$\overleftarrow{e}^{0(1)}_{ij} = P_e \delta_{ij}; \quad P_e = \frac{2n_e \mu_0}{5} \left[1 + \frac{5}{12} \left(\frac{\pi k T}{\mu_0} \right)^2 \right], \quad (13)$$

$$\overleftarrow{f}^{0(1)}_{ij} = P_f \delta_{ij}; \quad P_f = 9nk\gamma\theta_D + 3nkT\gamma \left[1 - 3\frac{\theta_D}{T} + \frac{1}{20} \left(\frac{\theta_D}{T} \right)^2 \right], \quad (14)$$

где n_e – число свободных электронов в единице объема; k – постоянная Больцмана; μ_0 – энергия Ферми; T – температура; n – число частиц в единице объема; γ – постоянная Грюнайзена; θ_D – температура Дебая.

Для тела B занимающего область V , ограниченную гладкой границей S , уравнения движения, краевые и начальные условия принимают вид

$$\nabla_{\vec{r}} \cdot \overleftarrow{\rho} \nabla_{\vec{r}} \cdot \overleftarrow{f} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}; \quad \vec{r} \in V \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \vec{n} \circ \overleftarrow{\rho} \nabla_{\vec{r}} \cdot \overleftarrow{f} - \nabla_S \circ \overleftarrow{\rho} \cdot \overleftarrow{f} &= \vec{\sigma}; \quad \vec{r} \in S \\ \vec{n} \circ \overleftarrow{\rho} \nabla_{\vec{r}} \cdot \overleftarrow{f} - \nabla_S \circ \overleftarrow{\rho} \cdot \overleftarrow{f} &= \vec{m} \end{aligned} \quad (16)$$

.....

при $t = 0$: $\vec{u} = \vec{u}_0$, $\vec{v} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = v_0$.

Дифференциальные уравнения как для внутренних точек – дифференциальная форма закона сохранения импульса, так и для граничных – краевые условия, имеют бесконечный порядок, количество краевых условий бесконечно.

Для решения конкретных задач в уравнения (15) и (16) необходимо подставить

выражение (7), предварительно вычислив интегралы (8) и (9).

КОНКРЕТИЗАЦИЯ ОБЩЕЙ МОДЕЛИ УПРУГОЙ СРЕДЫ

В конкретных расчетах потенциал парного взаимодействия частиц $dV_{(i)}$ и $dV_{(i)1}$ (при $i = j$ и $i \neq j$), избран в виде:

$$\Phi_{(i,j)}^{(2)} = D_{(i,j)} \left(e^{-2\beta_{(i,j)} a_{(i,j)}} - 2e^{-\beta_{(i,j)} a_{(i,j)}} \right), \quad (17)$$

являющийся аналогом потенциала Морзе [6].

Потенциал тройного взаимодействия внутри данного тела ($i = j$) [7]:

$$\begin{aligned} \Phi_{(i,j)}^{(3)} &= \Phi_{(i,i)}^{(3)} = \\ &= E_{(i,i)} \left(e^{-2\beta_{(i,i)1} a_{(i,i)1}} - 2e^{-\beta_{(i,i)1} a_{(i,i)1}} \right) \left(e^{-2\beta_{(i,i)2} a_{(i,i)2}} - 2e^{-\beta_{(i,i)2} a_{(i,i)2}} \right), \end{aligned} \quad (18)$$

для разных тел ($i \neq j$): $\Phi_{(i,j)}^{(3)} = 0$.

Потенциал (18) характеризует одновременное взаимодействие $dV_{(i)}$ с частицами $dV_{(i)1}$ и $dV_{(i)2}$.

В этих зависимостях параметр $\beta_{(i,i)}$, $i = 1, 2$ предложено определять на основании формулы [8]

$$\beta_{(i,i)} = \frac{45}{4} \frac{1}{l\sqrt{1/12}}. \quad (19)$$

Выражение (19) получено из условия совпадения результатов описания акустической ветви дисперсионного закона физикой твердого тела и динамическим вариантом рассматриваемой модели [9]. Принято также: $l = 1/\sqrt[3]{n}$, n – число атомов вещества в единице объема.

Для определения $D_{(i,i)}$ и $E_{(i,i)}$ получена система [7]:

$$\begin{cases} \left(\frac{16\pi}{15\beta_{(i,i)}^3} \right) D_{(i,i)} + \left(\frac{185\pi^2}{\beta_{(i,i)}^6} \right) E_{(i,i)} = \lambda \\ \left(\frac{16\pi}{15\beta_{(i,i)}^3} \right) D_{(i,i)} + \left(\frac{120\pi^2}{\beta_{(i,i)}^6} \right) E_{(i,i)} = \mu \end{cases}, \quad (20)$$

однозначно выражающая их значения через коэффициенты Ламэ: μ и λ .

Потенциал $\Phi_{(i,j)}^{(2)}$, $i \neq j$, взаимодействия частиц $dV_{(i)}$ и $dV_{(j)}$, принадлежащих разным телам $B_{(i)}$ и $B_{(j)}$, $i \neq j$, записывается так же в виде потенциала Морзе и аналогичен выражению (17).

Параметры этой зависимости $D_{(i,j)}$, $\beta_{(i,j)}$ предлагается определить с помощью аппроксимации на ее основе известного потенциала дисперсионного взаимодействия двух частиц [2]:

$$W_d = -\frac{A}{a_{(i,j)}^6}, \quad (21)$$

где $a_{(i,j)}$ – расстояние между частицами; A – постоянная Гамакера, который преобразуется к виду:

$$\Phi_{(i,j)}^{(2)*} = -\frac{An_{(i)}^2 n_{(j)}^2}{\left(\frac{a_{(i,j)}}{l^*} \right)^6}. \quad (22)$$

Функция $\left(\frac{l^*}{a(i,j)}\right)^6$ заменена на $\left(e^{-2\beta a(i,j)} - 2e^{-\beta a(i,j)}\right)$ из условия о том, что на

участке $a(i,j) \in \left[0, \infty\right)$ площади под их графиками совпадают, $D_{(j,k)} = -An_{(1)}^2 n_{(2)}^2$.

Потенциал тройного взаимодействия для сред из разных материалов принят равным нулю: $\Phi_{(i,j,k)}^{(3)} = 0$.

С помощью параметров $D_{(i,j)}$ и $E_{(i,j)}$ определяются тензоры $C^{(1,2)}$, $C^{(2,1)}$, $C^{(2,2)}$. Последующее решение задачи статики о напряженно-деформированном состоянии полупространства дает возможность рассчитать W_1 и W_2 для ряда конкретных материалов, а сопряженной задачи для системы $B_1 \cup B_2$ – значение $W_{1,2}$. Все это позволило рассчитать энергию f_a ряда простых материалов и сопоставить найденные значения с имеющимися в справочной литературе [8] данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод расчета поверхностной энергии и энергии адгезии изотропных твердых упругих материалов. Он использует в качестве исходных те характеристики материала (модули Юнга и сдвига, среднее межатомное расстояние), которые известны и представлены в справочной литературе для многих часто используемых конструкционных материалов. С его помощью возможен расчет энергии адгезии не только простых материалов, но и сплавов, химических соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лифшиц, Е. М. Теория молекулярных сил притяжения между конденсированными телами [Текст] / Труды Е. М. Лифшица под ред. Л. П. Питаевского, Ю. Г. Рудого. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 648 с.
2. Китель, Ч. Введение в физику твердого тела [Текст] / Ч. Китель. – М.: Наука, 1978. – 792 с.
3. Рюэль, Д. Статистическая механика. Строгие результаты [Текст] / Д. Рюэль. – М.: Мир, 1977. – 368 с.
4. Физический энциклопедический словарь [Текст]. – т. 1. – М.: Советская энциклопедия, 1960. – 664 с.
5. Л. Жирифалько. Статистическая физика твердого тела [Текст] / Л. Жирифалько. – М.: Мир, 1975. – 384 с.
6. Кривцов, А. М. Моделирование методом динамики частиц изменения внутренней структуры и напряжённого состояния в материале при сильном термическом воздействии [Текст] / А. М. Кривцов, В. П. Мясников. // Изв. РАН. МГТ, 2005. – № 1. – С. 88 – 103.
7. Азаров, А. С. Учет влияния трехчастичного взаимодействия в сплошной упругой среде на ее механические характеристики [Текст] / А. С. Азаров, В. С. Шоркин. // Сборник трудов 47 Международной конференции "Актуальные проблемы прочности". – Н.-Новгород, 2008. – С. 163 – 165.
8. Витковский, И. В. Теоретическое определение адгезионных свойств материалов для жидкометаллического blankets термоядерного реактора [Текст] / И. В. Витковский, А. Н. Конев, В. С. Шоркин. // ЖТФ, 2009, Т. 79, вып. 2. – С. 11 – 16.
9. Шоркин, В. С. Модель сплошной упругой среды, основанная на представлении о дальнедействующем потенциальном взаимодействии ее частиц [Текст] / В. С. Шоркин // Упругость и неупругость. Под ред. И. А. Кийко, Р.А. Васина, Г. Л. Бровка. – М.: Ленанд, 2006. – С. 271 – 282.
10. Свойства элементов. Физические свойства: Справочник [Текст] / Е. Б. Самсонов. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.

Фроленкова Лариса Юрьевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры "Физика"
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-44
E-mail: Lara@ostu.ru

Ю.Х. ПОЛАНДОВ, С.А. ВЛАСЕНКО

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ИНТЕГРИРОВАНИЮ ПО ПОВЕРХНОСТИ В ВЕКТОРНОМ ПОЛЕ

Предложен нестандартный подход к порядку вычисления интеграла по поверхности, в котором основной упор сделан на трактовке понятия правильной поверхности.

Ключевые слова: интеграл, поверхность, векторное поле.

The non-standard approach to an order of calculation of integral on a surface in which the basic emphasis is made on treatment of concept of a correct surface is offered.

Key words: an integral, a surface, the vector field.

Неотъемлемой частью теории поля является понятие поверхностного интеграла в векторном поле или, как его еще называют, интеграла по поверхности второго рода. Вывод интеграла сопряжен с необходимостью правильной ориентации поверхности в пространстве, а именно с выбором положительно направленного вектора нормали к поверхности в заданной точке, так как знак интеграла зависит от ориентации поверхности. Кроме того, важным фактором является еще и форма интегрируемой поверхности.

Рассмотрим вариант вывода интеграла по поверхности, подразумевающий справедливость указанных утверждений, но отличающийся от общепринятых доказательств [1-3].

Пусть в некоторой области V пространства $OXYZ$ задано векторное поле $\vec{A}(x, y, z) = A_x(x, y, z)\vec{i} + A_y(x, y, z)\vec{j} + A_z(x, y, z)\vec{k}$ и некоторая поверхность S , определяемая уравнением $z = z(x, y)$, у которой есть граница, очерченная пространственной кривой L (лежащей, естественно, на поверхности S). Относительно поля и поверхности будем предполагать в дальнейшем, что они непрерывны.

Далее, как и при выводе любого определенного интеграла рассмотрим поверхность S в бесконечно малом приближении. Для этого разобьем ее на $n \rightarrow \infty$ участков, площадь каждого из которых равна ΔS_i , где i – номер участка. Если принять поверхность i -го участка в виде плоского параллелограмма, то длина вектора нормали \vec{n}_i этой площадки будет равна ее площади ΔS_i при положительном обходе против часовой стрелки (исходя из геометрического смысла векторного произведения векторов, лежащих в основании параллелограмма), поэтому вектор нормали можно представить в виде $\Delta \vec{S}_i$.

Также примем, что значения поля \vec{A} , действующего на поверхности S , в каждой точке выбранной площадки равны $\vec{A}_i(S)$.

Для большей наглядности при описании поверхностного интеграла воспользуемся понятием векторного потока K , который определяется как скалярное произведение вектора поля \vec{A} и направления движения потока \vec{S} :

$$K = \vec{A} \cdot \vec{S}.$$

Поток векторного поля через i -ый участок в направлении нормали $\Delta \vec{S}_i$ можно рассчитать по формуле:

$$K_i = \vec{A}_i(S) \cdot \Delta \vec{S}_i. \quad (1)$$

Тогда с некоторой степенью точности поток через всю поверхность S определится суммированием частичных потоков по каждому элементарному участку

$$K \approx \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \vec{A}_i(S) \cdot \Delta \vec{S}_i. \quad (2)$$

Приняв, что площадь наибольшего из элементарных участков стремится к нулю, перейдем к пределу интегральной суммы (2):

$$K = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \max \Delta \vec{S}_i \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^n \vec{A}_i(S) \cdot \Delta \vec{S}_i, \quad (3)$$

который и называют интегралом по поверхности в векторном поле и обозначают в виде двойного интеграла

$$K = \iint_S \vec{A}(S) d\vec{S}, \quad (4)$$

Полученный интеграл, будучи одним из вариантов кратного интеграла, обладает всеми его свойствами, но к этому добавляется существенное замечание относительно ориентации вектора нормали к поверхности S . Ранее было замечено, что нормаль каждого элементарного участка поверхности определяется как результат векторного произведения векторов, лежащих на сторонах плоской площадки. Поэтому в случае ее обхода против часовой стрелки, вектор нормали изменит свое направление на противоположное, что повлияет на значение и поверхностного интеграла.

Данное свойство имеет непосредственное применение в расчете потоков: если поверхность расположена так, что векторное поле пересекает её повсюду изнутри – наружу, то $K > 0$, а если снаружи – вовнутрь, то $K < 0$. Если же поле частично пересекает поверхность изнутри – наружу, а частично снаружи – вовнутрь, то поток может оказаться положительным, отрицательным или равным нулю.

Далее рассмотрим порядок вычисления интеграла по поверхности. Так как данный интеграл является двойным, то следует выбрать две переменные интегрирования, то есть перейти от пространства к плоскости интегрирования. Это значит, что поверхность S необходимо спроецировать на координатные плоскости. Но тогда возникает требование, заключающееся в том, что интегрируемая поверхность должна быть правильной. В литературе [3] поверхность называют правильной, если всякая прямая параллельная только оси OZ , пересекает ее в одной точке. Следует отметить, что данное условие является необходимым, но не достаточным, поскольку для полного представления правильной поверхности необходимо потребовать, чтобы ее пересекали в единственных точках и прямые, параллельные остальным осям координат (точки A, B, C на рисунке 1).

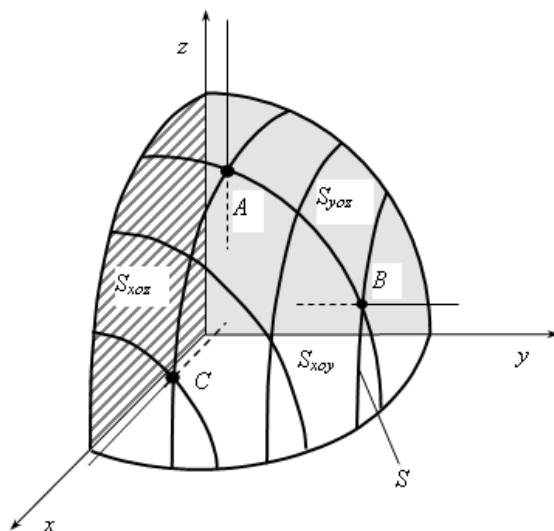


Рисунок 1 – Схема проецирования правильной поверхности S на координатные плоскости:

A, B, C – точки пересечения правильной поверхности с прямыми, параллельными осям координат;

S_{yoz}, S_{xoz} и S_{xoy} – проекции правильной поверхности на координатные плоскости.

Тогда поверхность будет спроецирована на координатные плоскости однозначно и без наложений, что актуально при рассмотрении именно интеграла по поверхности.

Так, например, обычная поверхность сфера – не является правильной, поскольку ее проецирование на координатные плоскости даст наложение ее фронтальной и «задней» частей, что внесет существенную ошибку при интегрировании. Поэтому для расчета интеграла по сфере последнюю разбивают на восемь правильных частей, каждую из которых в свою очередь проецируют на три координатные плоскости. В результате один интеграл по поверхности преобразуется в двадцать четыре двойных интеграла по координатным плоскостям.

Кроме того, если поверхность является правильной, то ее уравнение можно записать в явном виде относительно любой переменной: $z = z(x, y)$, $x = x(y, z)$ и $y = y(x, z)$, что позволит в дальнейшем беспрепятственно провести интегрирование кратных интегралов.

Итак, рассмотрим подробно интегральную сумму (2), в которой раскроем скалярное произведение векторов:

$$K \approx \sum_{i=1}^n \vec{A}_i(S) \cdot \Delta \vec{S}_i = \sum_{i=1}^n (A_x(S)_i \vec{i} + A_y(S)_i \vec{j} + A_z(S)_i \vec{k}) \cdot (\Delta S_x \vec{i} + \Delta S_y \vec{j} + \Delta S_z \vec{k}) =$$

$$= \sum_{i=1}^n (A_x(S)_i \cdot \Delta S_x + A_y(S)_i \cdot \Delta S_y + A_z(S)_i \cdot \Delta S_z), \quad (5)$$

где $A_x(S)_i$, $A_y(S)_i$ и $A_z(S)_i$ – проекции вектора $\vec{A}_i(S)$ на координатные оси. Для получения проекций при наличии уравнений векторного поля и поверхности, необходимо решить их совместно с исключением одной из координат:

$$A_x(S)_i = A(x_i, y_i, z_i),$$

$$A_y(S)_i = A(x_i, y_i, z_i),$$

$$A_z(S)_i = A(x_i, y_i, z_i).$$

Эти проекции вектора расположены на проекциях участков ΔS_x , ΔS_y , и ΔS_z соответственно, где $\Delta S_x = \Delta y \Delta z$, $\Delta S_y = \Delta x \Delta z$ и $\Delta S_z = \Delta x \Delta y$.

С учетом вышесказанного, уравнение потока можно переписать в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^n (A_x(x_i, y_i, z_i) \Delta y_i \Delta z_i + A_y(x_i, y_i, z_i) \Delta x_i \Delta z_i + A_z(x_i, y_i, z_i) \Delta x_i \Delta y_i) =$$

$$= \sum_{i=1}^n (A_x(x_i, y_i, z_i) \Delta y_i \Delta z_i) + \sum_{i=1}^n (A_y(x_i, y_i, z_i) \Delta x_i \Delta z_i) + \sum_{i=1}^n (A_z(x_i, y_i, z_i) \Delta x_i \Delta y_i).$$

Далее, устремив в бесконечность число участков за счёт уменьшения их размеров (без изменения границ поверхности S), получим, что интеграл по поверхности в пространстве можно рассчитать через сумму интегралов по координатным плоскостям

$$\iint_S \vec{A}(S) d\vec{S} = \iint_{S_{yoz}} A_x(x, y, z) dy dz + \iint_{S_{xoz}} A_y(x, y, z) dx dz + \iint_{S_{xoy}} A_z(x, y, z) dx dy, \quad (6)$$

где S_{yoz} , S_{xoz} и S_{xoy} – проекции поверхности S вместе с границей L на координатные плоскости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Письменный, Д.Т. Конспект лекций по высшей математике. [Текст] / Д.Т. Письменный, Ч. 2. 2-е изд., испр. – М.: Айрис-пресс, 2005. – 256 с.
2. Гусак А.А. Высшая математика: учеб. для студентов вузов. Т. 2. 3-е изд., стереотип. Мн.: ТетраСистемс, 2001. 448 с.
3. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов. Т 2. 12-е изд. М.: Наука, 1978. 575 с.

Поландов Юрий Христофорович

Орловский государственный технический университет
Доктор технических наук, с.н.с., профессор кафедры «Высшая математика»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 43-67-73
E-mail: polandov@yandex.ru

Власенко Светлана Анатольевна

Орловский государственный технический университет
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 43-67-73
E-mail: vlasenko_s_a@mail.ru

Б.Э. РУСТАМОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ РАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ГОРЯЩЕГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Рассматривается плоская стационарная задача механики разрушения для равномерно вращающегося горящего тела, имеющего произвольно размещенную трещиновидную полость, поверхность которой горит. Получены локальные условия, определяющие устойчивость (безопасность) режима для обоих концов трещиновидной полости.

Ключевые слова: твердое топливо, трещина, вращение, разрушение, сингулярное интегральное уравнение, режим горения-разрушения, локальное условие устойчивости.

The plane stationary problem of mechanics of fracture for regular intervals rotating burning body having any way placed cracked by cavity, which surface burn is considered. The local conditions defining stability (safety) of a mode for both ends cracked by cavity are received.

Key words: solid fuel, crack, rotation, destruction, singular integral equation, burning-destruction condition, resistance local condition.

Пусть горящее тело вращается с постоянной угловой скоростью ω и имеет одну прямолинейную трещиновидную полость, поверхность которой горит. Считаем, что все реагенты топлива равномерно распределены в твердой фазе, а продукты реакции сгорания газообразны. В процессе прогара твердого топлива фронт горения пламени может достичь края трещиновидной полости (дефекта) и горение быстро охватывает всю полость дефекта. При достаточно узкой и длинной полости из-за затрудненного газоотвода давление в ней может достигнуть столь большой величины, что приведет к выходу системы на неустойчивый режим [1]. Ограничимся временами, малыми по сравнению с характерным временем релаксации напряжений в топливе и с характерным временем нагревания топлива вследствие теплопроводности. На основании этого предположения тело можно считать реальным хрупким, а его температуру – постоянной.

Пусть твердое топливо занимает область в виде круга радиуса R . В центре трещиновидной полости поместим начала локальной системы координат $O_1x_1y_1$, ось x_1 которой совпадает с линией трещины и образует угол α_1 с осью x (рис. 1). Топливо вращается с постоянной угловой скоростью ω вокруг оси, перпендикулярной к плоскости сечения топлива и проходящей через ее центр.

Рассматривается модель трещины с силами сцепления (связями), непрерывно распределенными в узкой концевой зоне трещины (область D) и имеющими заданную диаграмму деформирования. При этом силы сцепления (связи) будут сосредоточены в некоторой узкой области D , размер этой области заранее неизвестен и должен быть определен из решения задачи. Всюду в дальнейшем граничные условия с поверхности полости и области D носим на прямую $y_1 = 0$ точно также, как это делается, например, в теории тонкого крыла в аэродинамике.

Принято, что процесс разрушения локализован в концевой области D , которая рассматривается как часть трещиновидной полости и может быть сравнима с размером полости, а связи образованы частицами в композиционном материале топлива. В исследуемом

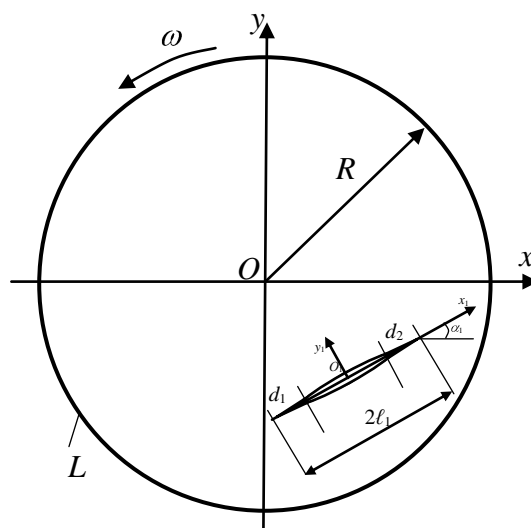


Рисунок 1 – Расчетная схема задачи

случае зону процесса разрушения можно моделировать как некоторый слой (концевую область), примыкающей к трещиноподобной полости и содержащий материал с частично нарушенными связями между его отдельными структурными элементами.

Выделим части трещины d_1 и d_2 (концевые зоны), в которых берега трещины взаимодействуют. Взаимодействие берегов трещины в концевых областях моделируется путем введения между берегами трещины связей (сил сцепления) с заданной диаграммой деформирования. Физическая природа таких связей и размеры концевых областей зависят от вида материала.

Рассмотрим случай плоской стационарной задачи.

По мере нагружения тела в связях, соединяющих берега трещиновидной полости в концевых зонах, будут возникать нормальные q_{y_1} и касательные $q_{x_1 y_1}$ усилия. Величины этих напряжений и размеры d_1 и d_2 концевых зон заранее неизвестны и подлежат определению в процессе решения задачи механики разрушения. Концевые области малы по сравнению с остальной частью топлива. Поэтому их можно мысленно удалить, заменив разрезами, поверхности которых взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала. Следовательно, к берегам трещиновидной полости в концевых зонах будут приложены нормальные и касательные напряжения, численно равные q_{y_1} и $q_{x_1 y_1}$, соответственно.

Основные граничные условия для твердого топлива имеют вид

$$\sigma_r - i\tau_{r\theta} = 0 \quad \text{при } |x + iy| = R \quad (1)$$

$$\sigma_{y_1} - i\tau_{x_1 y_1} = -p \quad \text{при } y_1 = 0, \quad \lambda_1 < x_1 \leq \lambda_2 \quad (2)$$

$$\sigma_{y_1} - i\tau_{x_1 y_1} = q_{y_1} + iq_{x_1 y_1} \quad \text{при } -\ell_1 \leq x_1 \leq \lambda_1 \text{ и } \lambda_2 \leq x_1 \leq \ell_1,$$

где $i = \sqrt{-1}$; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – компоненты тензора напряжений; p – интенсивность давления газа в полости;

В рассматриваемом случае будем иметь уравнения плоской теории упругости при наличии объемных сил [2].

Уравнения течения газа в трещиновидной полости для плоского стационарного случая в пренебрежении эрозией имеют вид [3]

$$p = C_0 \rho^\chi; \quad \frac{V_{x_1}^2}{2} + \frac{\chi}{\chi - 1} \frac{p}{\rho} = C_1 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx_1} (\rho V_{x_1}) = \rho_s f(p); \quad h = h_0(x_1) + \int f(p) dp + \nu;$$

$$C_0 = p_0 \rho_0^{-\chi}; \quad \kappa_0 = 3 - 4\mu; \quad C_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_s}{\rho_1} \right) f^2 - \frac{\chi}{\chi - 1} \frac{p_1}{\rho_1}$$

Здесь μ – коэффициент Пуассона; p_0, ρ_0 и p_1, ρ_1 – давление и плотность газа в камере сгорания при $x_1 = 0$ и в конце трещиновидной полости соответственно (величины с индексом 1 подлежат определению); $h_0(x)$ – заданная толщина начальной полости; χ – показатель адиабаты; ρ_s – плотность твердой фазы; $f(p)$ – некоторая функция.

Для замкнутости задачи основные соотношения должны быть дополнены уравнениями, связывающими перемещения раскрытия берегов концевых зон и усилия в связях. Без потери общности, эти уравнения можно представить в виде [4, 5]

$$u_1^+(x_1, 0) - u_1^-(x_1, 0) = i [u_1^+(x_1, 0) - u_1^-(x_1, 0)] = C(x_1, \sigma) [u_{y_1}^+(x_1) - iq_{x_1 y_1}(x_1)] \quad (4)$$

где x_1 – аффикс точек берегов трещины в концевых зонах; функцию $C(x_1, \sigma)$ можно рассматривать как эффективную податливость связей; $\sigma = \sqrt{q_{y_1}^2 + q_{x_1 y_1}^2}$ – модуль вектора усилий в связях; $\langle u_1^+ - u_1^- \rangle$ – нормальная составляющая раскрытия берегов концевой зоны; $\langle u_1^+ - u_1^- \rangle$ – касательная составляющая раскрытия берегов концевой зоны.

Решение задачи плоской теории упругости при наличии объемных сил ищем в виде

$$\sigma_x = \sigma_x^0 + \sigma_x^*; \quad \sigma_y = \sigma_y^0 + \sigma_y^*; \quad \tau_{xy} = \tau_{xy}^0 + \tau_{xy}^*, \quad (5)$$

Здесь $\sigma_x^*, \sigma_y^*, \tau_{xy}^*$ есть частное решение плоской теории упругости при наличии объемных сил, вызванных равномерным вращением круглого сечения топлива без дефектов. Это распределение напряжений, известно [2]. С учетом (5) краевые условия для определения напряжений $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$ принимаю вид

$$\text{при } r = R \quad \sigma_r^0 - \tau_{r\theta}^0 = -\langle \sigma_r^* - \tau_{r\theta}^* \rangle \quad (6)$$

на берегах трещиновидной полости с концевыми зонами

$$\text{при } y_1 = 0, \quad \lambda_1 < x_1 \leq \lambda_2 \quad \sigma_{y_1}^0 - i\tau_{x_1 y_1}^0 = -\langle \sigma_{y_1}^* - i\tau_{x_1 y_1}^* \rangle - p \langle \sigma_{x_1}^* \rangle \quad (7)$$

$$\text{при } y_1 = 0, \quad -\ell_1 \leq x_1 \leq \lambda_1 \text{ и } \lambda_2 \leq x_1 \leq \ell_1 \quad \sigma_{y_1}^0 - \tau_{x_1 y_1}^0 = q_{y_1} - iq_{x_1 y_1} - \langle \sigma_{y_1}^* - i\tau_{x_1 y_1}^* \rangle$$

Для компонент тензора напряжений $\sigma_r^0, \sigma_\theta^0, \tau_{r\theta}^0$ и $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$ справедливы следующие формулы Колосова-Мусхелишвили [2]

$$\sigma_x^0 + \sigma_y^0 = \sigma_r^0 + \sigma_\theta^0 = 4 \operatorname{Re} \Phi \langle z \rangle, \quad z = x + iy \quad (8)$$

$$\sigma_y^0 - \sigma_x^0 + 2i\tau_{xy}^0 = \langle \sigma_\theta^0 - \sigma_r^0 + 2i\tau_{r\theta}^0 \rangle e^{-2i\theta} = 2 [\Phi' \langle z \rangle + \Psi \langle z \rangle]$$

Для решения краевой задачи (6) – (7) теории упругости с прямолинейной трещиновидной полостью с концевыми зонами используем формулы (8). Тогда граничные условия (6) – (7) запишутся в виде

$$\text{при } r = R \quad \Phi \langle z \rangle + \overline{\Phi \langle z \rangle} - e^{2i\theta} [\Phi' \langle z \rangle + \Psi \langle z \rangle] - \langle \sigma_r^* \rangle - i\tau_{r\theta}^* \langle \theta \rangle \quad (9)$$

$$\text{при } y_1 = 0, \quad \lambda_1 < t_1 < \lambda_2 \quad \Phi \langle z \rangle + \overline{\Phi \langle z \rangle} + t_1 \Phi' \langle z \rangle + \overline{\Psi \langle z \rangle} = -\langle \sigma_{y_1}^* \rangle - i\tau_{x_1 y_1}^* \langle \theta \rangle - p$$

$$\text{при } y_1 = 0, \quad -\ell_1 \leq t_1 \leq \lambda_1 \text{ и } \lambda_2 \leq t_1 \leq \ell_1 \quad \Phi \langle z \rangle + \overline{\Phi \langle z \rangle} + t_1 \Phi' \langle z \rangle + \overline{\Psi \langle z \rangle} = q_{y_1} - iq_{x_1 y_1} - \langle \sigma_{y_1}^* \rangle - i\tau_{x_1 y_1}^* \langle \theta \rangle \quad (10)$$

где t_1 – аффикс точек берегов трещиновидной полости с концевыми зонами.

Комплексные потенциалы $\Phi \langle z \rangle$ и $\Psi \langle z \rangle$ ищутся в виде

$$\Phi \langle z \rangle = \Phi_0 \langle z \rangle + \Phi_1 \langle z \rangle; \quad \Psi \langle z \rangle = \Psi_0 \langle z \rangle + \Psi_1 \langle z \rangle \quad (11)$$

Здесь комплексные потенциалы $\Phi_1 \langle z \rangle$ и $\Psi_1 \langle z \rangle$ ищутся в виде

$$\Phi_1 \langle z \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\ell_1}^{\ell_1} \frac{g_1(t) dt}{t - z_1}; \quad (12)$$

$$\Psi_1 \langle z \rangle = \frac{e^{-2i\alpha_1}}{2\pi} \int_{-\ell_1}^{\ell_1} \left[\frac{g_1(t)}{t - z_1} - \frac{\overline{T_1} e^{i\alpha_1} \cdot g_1(t)}{\langle z - z_1 \rangle} \right] dt, \quad T_1 = te^{i\alpha_1} + z_1^0, \quad z_1 = e^{-i\alpha_1} \langle z - z_1^0 \rangle,$$

где $g_1(t)$ – искомая функция, характеризующая перемещения при переходе через линию трещиновидной полости с концевыми зонами.

Неизвестная функция $g_1(t)$ и комплексные потенциалы $\Phi_0 \langle z \rangle$ и $\Psi_0 \langle z \rangle$ должны быть определены из граничных условий на контуре $L \langle z \rangle = R$ и берегах трещиновидной полости с концевыми зонами. Используя (11)-(12) с помощью метода Н.И. Мусхелишвили, после некоторых преобразований находим

$$\begin{aligned} \Phi_0(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\ell_1}^{\ell_1} \left\{ \left(\frac{1}{z\bar{T}_1 - 1} + \frac{1}{2} \right) \bar{T}_1 g_1(\tau) + \left[\frac{T_1}{2} - \frac{z^2 \bar{T}_1 - 2z + T_1}{\bar{T}_1 - 1} \right] e^{-i\alpha_1} \overline{g_1(\tau)} \right\} dt + \Phi_{00}(z) \quad (13) \\ \Psi_0(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\ell_1}^{\ell_1} \left[\frac{e^{i\alpha_1} \bar{T}_1^3}{\bar{T}_1 - 1} g_1(\tau) + \left(2\bar{T}_1^2 + 4 - 3z\bar{T}_1 + zT_1\bar{T}_1^2 - 3T_1\bar{T}_1 - \frac{\bar{T}_1 e^{-i\alpha_1}}{\bar{T}_1 - 1} \right) \overline{g(\tau)} \right] dt + \\ &+ \frac{1}{z^2} \Phi_{00}(z) + \frac{1}{z^2} \overline{\Phi_{00}\left(\frac{1}{z}\right)} - \frac{1}{z} \Phi'_{00}(z) \\ \Phi_{00}(z) &= -\frac{1}{2\pi i} \int_L \left[\mathbf{R}^*(\tau) + \tau_{r\theta}(\tau) \right] \left(\frac{1}{\tau - z} - \frac{1}{2\tau} \right) d\tau. \end{aligned}$$

Удовлетворяя функциями (11), (12), (13) краевым условиям (10) после некоторых преобразований, получим комплексное сингулярное интегральное уравнение относительно неизвестной функции $g_1(z)$:

$$\int_{-\ell_1}^{\ell_1} \left[\mathbf{R}(x_1) g_1(\tau) + S(x_1) \overline{g_1(\tau)} \right] dt = \pi \left[f_0(z) + f(z) \right] \quad |x_1| \leq \ell_1 \quad (14)$$

Здесь $f_0(z) = -\mathbf{R}_{00}(z) + \overline{\Phi_{00}(z)} + x_1 \overline{\Phi'_{00}(z)} + \overline{\Psi_{00}(z)}$

$$f(z) = \begin{cases} -p - \mathbf{R}_{y_1}^* - i\tau_{x_1 y_1}^* & \text{при } y_1 = 0 \quad \lambda_1 < x_1 < \lambda_2 \\ q_{y_1} - iq_{x_1 y_1} - \mathbf{R}_{y_1}^* - i\tau_{x_1 y_1}^* & -\ell_1 \leq x_1 \leq \lambda_1 \quad \text{и} \quad \lambda_2 \leq x_1 \leq \ell_1 \end{cases}$$

Из-за некоторой громоздкости функции $R(x_1)$ и $S(x_1)$ не приводятся в явном виде.

Для внутренней трещиновидной полости к сингулярному интегральному уравнению необходимо добавить дополнительное равенство

$$\int_{-\ell_1}^{\ell_1} g_1(t) dt = 0, \quad (15)$$

обеспечивающего однозначность смещений при обходе контура трещиновидной полости с концевыми зонами.

Для левой части соотношения (4) имеем

$$\mathbf{u}_1^+(z, 0) - v_1^-(z, 0) + i \mathbf{u}_1^+(z, 0) - u_1^-(z, 0) = -\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \int_{-\ell_1}^{\ell_1} g_1(x_1) dx_1 \quad (16)$$

С учетом (16) и отделяя действительные и мнимые части, находим

$$-\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \int_{-\ell_1}^{\ell_1} v_1(x_1) dx_1 = C(z, \sigma) g_{y_1}(z) \quad (17)$$

$$-\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \int_{-\ell_1}^{\ell_1} u_1(x_1) dx_1 = C(z, \sigma) g_{x_1 y_1}(z) \quad (18)$$

Таким образом, сингулярное интегральное уравнение (14) с дополнительным условием (15), уравнения течения газа (3) в полости и уравнения (17), (18) должны решаться совместно.

Интегральное уравнение (14) при дополнительном условии (15) с помощью процедуры алгебраизации сводится [6, 7] к системе M алгебраических уравнений для определения M неизвестных $g_1(z_m)$ ($m = 1, 2, \dots, M$):

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[\mathbf{R}(t_m, \ell_1 x_r) g_1(t_m) + \overline{g_1(t_m)} S(t_m, \ell_1 x_r) \right] = f_0(x_r) + f(x_r) \quad (19)$$

$(r = 1, 2, \dots, M-1)$

$$\sum_{m=1}^M g_1(t_m) = 0,$$

где $t_m = \cos \frac{2m-1}{2M} \pi$ ($m = 1, 2, \dots, M$), $x_r = \cos \frac{\pi r}{M}$ ($r = 1, 2, \dots, M-1$).

В правую часть системы (19) входят неизвестные значения усилий $q_{y_1}(x_1)$ и $q_{x_1 y_1}(x_1)$ в узловых точках, а также интенсивность давления газа.

Требую выполнения условий (17) и (18) в узловых точках, принадлежащих конечным зонам, получим две системы из M_1 уравнений каждая для определения значений $q_{y_1}(\varphi_{m_1})$ и $q_{x_1 y_1}(\varphi_{m_1})$ ($m_1 = 1, 2, \dots, M_1$):

$$\left\{ \begin{aligned} B u_1(\varphi_1) &= C \varphi_1, \sigma \varphi_1 \vartheta_{y_1}(\varphi_1), \\ B \varphi_1(\varphi_1) + u_1(\varphi_2) &= C \varphi_2, \sigma \varphi_2 \vartheta_{y_1}(\varphi_2), \\ &\dots \\ B \sum_{m_1=1}^{M_1} u_1(\varphi_{m_1}) &= C \varphi_{M_1}, \sigma \varphi_{M_1} \vartheta_{y_1}(\varphi_{M_1}) \end{aligned} \right. \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{aligned} B u_1(\varphi_1) &= C \varphi_1, \sigma \varphi_1 \vartheta_{x_1 y_1}(\varphi_1), \\ B \varphi_1(\varphi_1) + u_1(\varphi_2) &= C \varphi_2, \sigma \varphi_2 \vartheta_{x_1 y_1}(\varphi_2), \\ &\dots \\ B \sum_{m_1=1}^{M_1} u_1(\varphi_{m_1}) &= C \varphi_{M_1}, \sigma \varphi_{M_1} \vartheta_{x_1 y_1}(\varphi_{M_1}), \end{aligned} \right. \quad (21)$$

где $B = -\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \frac{\pi \ell_1}{M}$.

Полученные алгебраические системы уравнений не являются пока замкнутыми. Для замкнутости полученных алгебраических уравнений не хватает двух уравнений, выражающих условия разрешимости интегрального уравнения. Записывая эти условия

$$\sum_{m=1}^M (-1)^m g_1(\varphi_m) \operatorname{ctg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0, \quad \sum_{m=1}^M (-1)^{M+m} g_1(\varphi_m) \operatorname{tg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0 \quad (22)$$

получим замкнутую систему алгебраических уравнений для определения значений $g_1(\varphi_m)$ ($m = 1, 2, \dots, M$), усилия в связях $q_{y_1}(\varphi_{m_1})$ и $q_{x_1 y_1}(\varphi_{m_1})$ ($m_1 = 1, 2, \dots, M_1$), давления газа в полости, а также размеры конечных зон. Из-за неизвестных размеров конечных зон трещиновидной полости даже при линейно-упругих связях системы алгебраических уравнений оказались нелинейными.

Для определения предельного равновесия трещиновидной полости в горящем топливе принимаем условие критического раскрытия берегов трещины. Считается, что разрыв связей на берегах конечной зоны (при $x = x_0$) происходит при выполнении условия

$$\sqrt{[I_1^+(x_{01}, 0) - u_1^-(x_{01}, 0)] + [I_1^+(x_{01}, 0) - u_1^-(x_{01}, 0)]} = \delta_c, \quad (23)$$

где δ_c – предельная вытяжка связей.

Используя полученное решение, после некоторых преобразований условие роста трещиновидной полости приведем к виду

$$-B \sqrt{A^2 + A_1^2} = \delta_c, \quad (24)$$

где $A = \sum_{m_1=1}^{M_1} u_1(\varphi_{m_1})$; $A_1 = \sum_{m_1=1}^{M_1} u_1(\varphi_{m_1})$.

Совместное решение уравнений (3), (19) – (21), (22), (24) позволяет при заданных характеристиках связей определить критическую интенсивность давления в полости, усилия в связях, размеры концевых зон трещинообразной полости для состояния предельного равновесия. Напомним, что эти разрешающие уравнения служат для отыскания усилий в связях, смещений $u_1(\xi)$ и $u_2(\xi)$, размеров концевых зон, а также величин $p_1(\xi)$, $V_x(\xi)$, $h(\xi)$ и $\rho(\xi)$. Функция $p(\xi)$ ищется в виде многочлена с неизвестными коэффициентами, а уравнение для $p(\xi)$ удовлетворяется приближенно в смысле наибольшей невязки. Для оценочных расчетов и практических приложений можно ограничиться линейным приближением. В случае нелинейного закона деформирования связей для определения усилий в концевых зонах, использовался также алгоритм, подобный методу упругих решений [8].

Полученное решение позволяет сформулировать достаточное условие устойчивости режима системы. Эти локальные условия устойчивости режима получены в следующем виде

$$C(\xi_1, \sigma(\xi_1)) \geq \delta_c \quad \text{для левого конца полости}$$

$$C(\xi_2, \sigma(\xi_2)) \geq \delta_c \quad \text{для правого конца полости}$$

Локальное условие устойчивости (безопасности) режима «горение – разрушение» позволяет путем численного решения для каждого конкретного вида твердого топлива прогнозировать предельный допустимый размер трещиновидной полости (технологического дефекта). При нарушении этого условия начинается локально неустойчивый процесс «горения – разрушения».

ЛИТЕРАТУРА

1. Соркин, Р.Е. Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе [Текст] /Р.Е. Соркин. – М.: Наука, 1967. – 326 с.
2. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости [Текст] / Н.И. Мухелишвили – М.: Наука, 1966. – 707 с.
3. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Г.П. Черепанов – М.: Наука, 1974. – 640 с.
4. Гаджиев, В.Д. Предельно-равновесное состояние детали типа втулки при наличии трещин со связями между берегами [Текст] / В.Д. Гаджиев, В.М. Мирсалимов. – Оптимальное проектирование механических систем. – Баку: Элм, 1999. С. 50-63.
5. Гольдштейн, Р.В. Рост трещин по границе соединения материалов [Текст] / Р.В. Гольдштейн, М.Н. Перельмутер. – Проблемы механики. – М.: Физматлит, 2003, С. 221 – 238.
6. Панасюк, В.В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках [Текст] / В.В. Панасюк, М.П. Саврук, А.П. Дацышин. – Киев: Наукова думка, 1976. – 443с.
7. Мирсалимов, В.М. Неоднородные упругопластические задачи [Текст] / В.М. Мирсалимов – М.: Наука, 1987. – 256 с.
8. Ильюшин, А.А. Пластичность [Текст] / А.А. Ильюшин. – М.; Л.: Гостехтеоретиздат. 1948. – 376 с.

Рустамов Бахтияр Эйюб оглы

Азербайджанская государственная Академия физической культуры и спорта
доцент, кандидат физико-математических наук, доцент
AZ 1129, г. Баку, ул. Н. Туси, д. 14, кв. 63
Тел. (+99450) 539-11-88
E-mail irakon63@hotmail.com

УДК 629.114.401

В.Н. ХРОМОВ, С.А. ЗАЙЦЕВ

ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ ЛАП КУЛЬТИВАТОРА ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

Рассмотрена технология упрочнения лап культиватора газопламенным напылением. Для напыления предложен новый порошковый материал. Рекомендованы рациональные режимы газопламенного напыления. Подробно описаны операции подготовки поверхности для напыления и последующего оплавления напыленной поверхности.

Ключевые слова: упрочняющие технологии, лапы культиваторов, газопламенное напыление.

The technology of cultivator slice shares hardening by flame spraying is examined. New powder material is suggested to carry out the process of spraying. Rational modes of flame spraying are recommended. The surface preparation operations for spraying and further melting of the sprayed surface are described in detail.

Key words: strengthening technologies, paws of cultivators, gas-flame covering.

Технология упрочнения лапы культиватора газопламенным напылением это последовательность операций технологического процесса включающих подготовку поверхности лапы перед напылением, напыление покрытия, оплавление напыленного покрытия и механическая обработка упрочненной поверхности лапы.

Газопламенное напыление включает в себя процесс нанесения покрытий, в основе которого лежит нагрев порошкового материала до жидкого или пластичного состояния и его распыление газовой струей. Особенности газопламенного напыления являются: высокая производительность (до 40 кг/ч), возможность получения слоев в достаточно большом диапазоне толщины (0,1...2 мм), простота нанесения покрытия на детали различных конфигураций и размеров, универсальность используемых материалов как по форме (порошки, проволоки), так и физико-механическим свойствам (металлы, керамика, композиционные материалы).

Разнообразие технологических разновидностей способа и приемов его выполнения позволяет получать композиционные и комбинированные покрытия различного назначения, сочетающие в себе уникальные, порой противоположные свойства, например хорошую прирабатываемость и высокую износостойкость. Все это обусловило применение метода газопламенного напыления для упрочнения лап культиватора.

Внедрение технологии газопламенного напыления порошковыми материалами сдерживает сравнительно высокая стоимость напыляемых порошков.

Для удешевления стоимости применяемых порошковых материалов и повышения износостойкости напыляемых покрытий, нами проведен ряд экспериментальных исследований по изучению влияния зависимости состава механической смеси двух порошковых материалов ПР-НХ17 и ПР-Х4ГСП на износостойкость получаемого из них покрытия.

Анализ факторов газопламенного напыления влияющих на износостойкость получаемых покрытий показал, что наиболее важным является процентное содержание в

механической смеси двух порошков, порошка ПР-НХ17, вторым по значимости является дистанция напыления, третьим – фракция порошка и температура оплавления, другие факторы являются малозначительными и ими можно пренебречь.

Планирование многофакторного эксперимента для выявления рациональных режимов газопламенного напыления и их влияние на функцию отклика (износостойкость покрытия) позволило найти наиболее благоприятное соотношение механической смеси напыляемых порошков: порошок ПР-НХ17=40%, а порошок ПР-Х4ГСП=60%.

Для получения износостойких покрытий нами разработан технологический процесс упрочнения лап культиваторов газопламенным напылением порошкообразным материалом, содержащим механическую смесь порошка ПР-НХ17=40% и порошка ПР-Х4ГСП=60% и включает в себя следующие операции: очистка, дефектация, оттяжка (для восстанавливаемых лап культиватора), пескоструйная обработка упрочняемой поверхности, подготовка порошковой износостойкой смеси, газопламенное нанесение порошковой смеси и ее оплавление, контроль качества. Механическая обработка упрочненной поверхности не требуется, так как при эксплуатации упрочненной лапы культиватора работает эффект самозатачивания.

Операция очистки лапы культиватора состоит в очистке от грязи и жировых отложений металлической поверхности лапы с помощью моющих средств типа Лабомид-315 с последующим споласкиванием в синтетическом моющем средстве типа Лабомид-102. Сушку деталей после промывки проводят в сушильном шкафу при температуре 80-150°C или обдувают сжатым воздухом.

Операция дефектации включает определение погнутой лапы и затупления лезвия, износа по ширине, толщине носка и лезвия лапы.

Операция подготовки поверхности лапы к напылению для получения требуемой шероховатости напыляемой поверхности - ее подвергают пескоструйной обработке. Шероховатость поверхности после обработки должна быть $R_z = 120 - 60$ мкм.

Следы масла или каких-либо других загрязнений на восстанавливаемой поверхности, как известно, резко снижают прочность сцепления напыленных покрытий. В связи с этим подготовленная к напылению поверхность детали должна тщательно оберегаться от загрязнения. Трогать поверхность руками без сухих чистых хлопчатобумажных перчаток не допускается. Детали, поверхности которых подготовлены к напылению, необходимо хранить на специальных закрывающихся стеллажах, время их хранения до напыления не должно превышать 2,5 ч.

Контроль качества струйной обработки ведется сравнением с эталонными образцами, в качестве которых могут быть детали, обработанные на вышеуказанных режимах. Эталонные образцы необходимо хранить в чистой сухой плотно закрытой полиэтиленовой упаковке.

Для нанесения покрытий использовали порошковую газопламенную горелку фирмы «ТЕРМИКА» «Искра-1».

В качестве горючего газа использовался ацетилен баллонный ГОСТ5457-85, транспортирующего газа - кислород баллонный ГОСТ-5583-88.

В качестве материала, напыляемого на поверхность стали 65Г, служил порошкообразный материал, для напыления износостойких покрытий, состоящий из механической смеси двух порошков с фракцией 40 - 60 мкм. (порошок ПР-НХ17 и порошок ПР-Х4ГСП), защищенный Патентом РФ № 2337178 [1].

Сушку порошка проводили в шкафу сушильном СНОЛ-3,5 при температуре $t=120...150^{\circ}\text{C}$ в течение 1...1,5 часа, просев - на вибросите 028М.

Изолирование прилегающих поверхностей не подвергаемых напылению осуществляли с помощью защитных экранов из фольги, закрепляемых проволокой.

При газопламенном напылении с последующим оплавлением напыляемую поверхность первоначально разогревают в печи СНОЛ-3,5 до температуры $t=200^{\circ}\text{C}$. Периодическими нажатиями на рычаг горелки подают на деталь порошок. Перемещениями пламени горелки производят равномерное расплавление порошка на нагретой поверхности.

Газопламенное напыление ведется в следующем режиме: давление кислорода 0,4...0,45 МПа, ацетилена 0,07...0,1 МПа, дистанция напыления 20 см, угол атаки 90⁰, производительность 1,5...2,5 кг/ч, фракция порошка 40...60 мкм.

После напыления порошков покрытие оплавлялось той же горелкой с использованием ацетиленокислородного пламени, но без подачи порошка. Участок, покрытый порошком, нагревают до полного расплавления всех зерен металла в напыленном слое, в результате получают блестящую поверхность. Оплавление проводили при температуре 1000⁰С (рисунок 1).

При таком способе упрочнения лапы культиватора КППШ-6 достигается твердость поверхности равная 56 HRC₃, что превышает твердость не упрочненной равной 45...50 HRC₃,



Рисунок 1 – Оплавление напыленной лапы культиватора

Для проведения исследований износостойкости полученных покрытий в реальных условиях были выбраны лапы культиваторов комбинированных КППШ-6.

Одновременно с упрочненными деталями устанавливали серийные лапы, изготовленные из стали 65Г. Рыхлительные лапы устанавливали на культиватор в шахматном порядке.

Параметрами, определяющими текущее состояние рабочего органа, являлись его общая длина и масса. Данные параметры контролировались каждые 2 га до наработки 10 га и через каждые 5 га до достижения наработки 30 га, при этом рабочие органы снимали с машины и очищали от остатков почвы. Длину рабочего органа контролировали штангенциркулем с точностью 0,05 мм. Взвешивание выполняли на весах ВЛР-1 по ТУ 25.06-383-74. По полученным данным вычислили относительную износостойкость рабочего органа, принимая износостойкость серийной лапы за единицу. Одновременно визуально оценивали состояние покрытия: сколы, трещины, отслоение, равномерность износа.

При испытаниях количество лап должно обеспечивать достаточную точность. Примем, что распределение износов подчиняется нормальному закону распределения. Коэффициент вариации V при испытаниях на износостойкость составляет 0,3...0,4. Доверительная вероятность a в пределах 0,80...0,95 считается для испытаний сельскохозяйственной техники удовлетворительной. Число лап N определяется из выражения:

$$\frac{\gamma_L}{V} = \frac{t_{nL}}{\sqrt{N}}, \quad (1)$$

где γ_L – относительная ошибка, обычно $\gamma_L = 0,20...0,10$;

V – коэффициент вариации;

t_{nL} – коэффициент Стьюдента;

N – число лап.

Подставляя $\gamma_L=0,20$ и $V=0,30$ находим, что $\frac{t_{nL}}{\sqrt{N}}=0,667$. При $a=0,8$ по таблице коэффициентов Стьюдента находим, что $N=5$.

Следовательно, при установке на культиваторе пяти экспериментальных и пяти серийных лап это обеспечит достаточную достоверность результатов.

Испытания лап культиваторов во время реальной эксплуатации дали возможность определить зависимости изнашивания деталей в зависимости от наработки. Испытания проводились на среднесуглинистых почвах при средней влажности 19%.

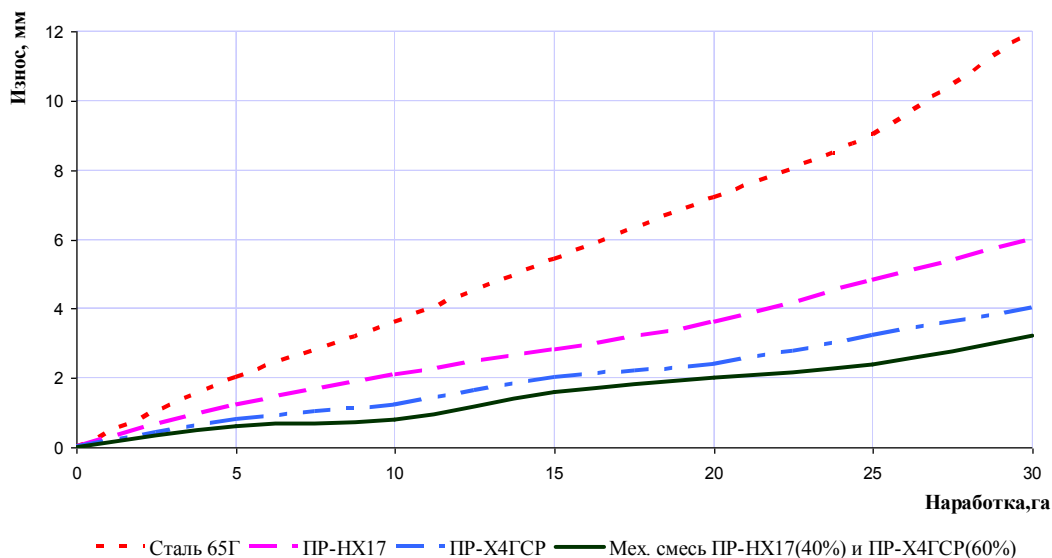


Рисунок 2 – Износ лап культиватора по длине в зависимости от наработки

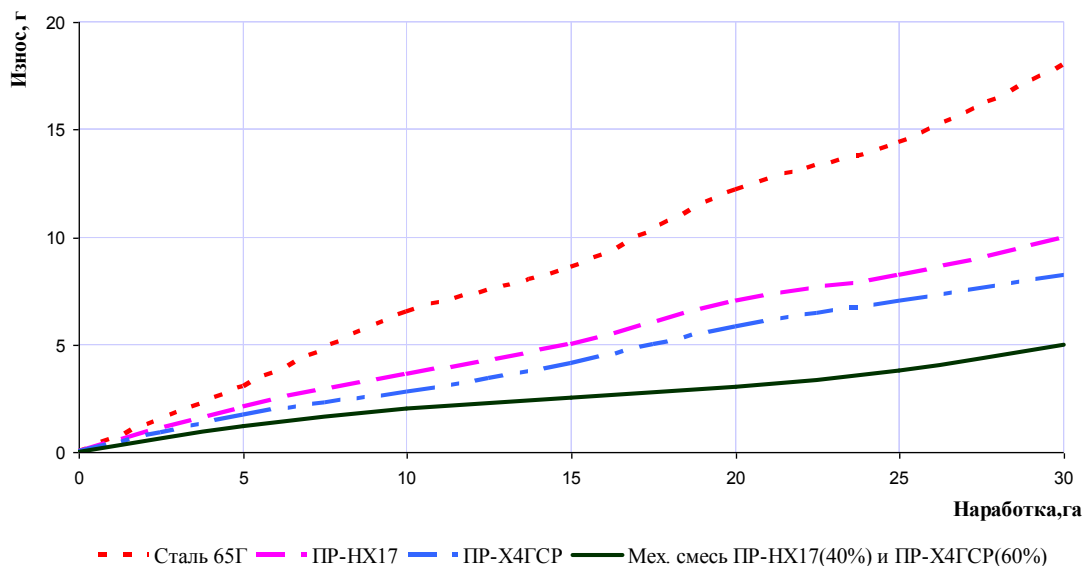


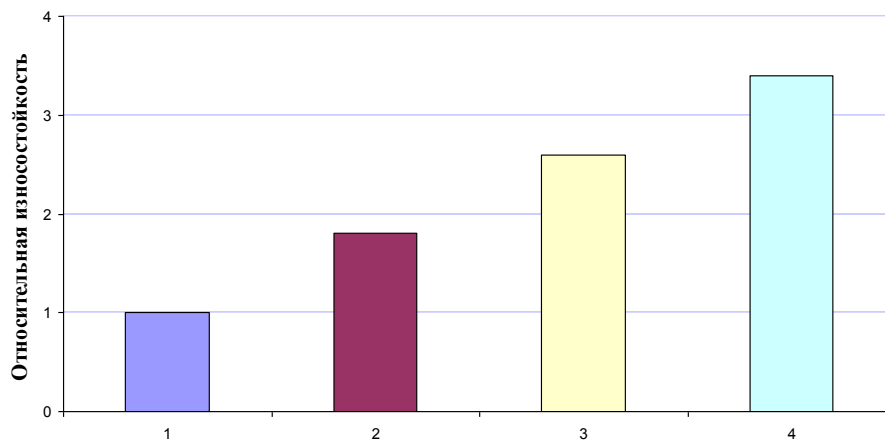
Рисунок 3 – Износ лап культиватора по массе в зависимости от наработки

Нарботка для всех рабочих органов составила 30 га. Результаты эксплуатационных испытаний представлены на рисунках 2 и 3.

Серийные лапы при наработке 30 га изнашивались в среднем на 12 мм или на 18 г. Износ лап, упрочненных порошкообразным материалом, для напыления износостойких покрытий, составил, в среднем, 3,8 мм или 5 г. Напыление разработанной смесью уменьшило износ лап культиватора на 8,2 мм, что соответствует потере массы на 13 г.

На рисунке 4 представлена относительная износостойкость лап культиваторов с нанесенным покрытием. При построении графика были использованы данные рисунка 2, так

как выбраковочным параметром для лап культиватора является ее длина. Исследуемые покрытия показали относительную износостойкость равную 3,4 по сравнению с серийно выпускаемой лапой из стали 65Г, принимавшуюся равной 1.



**Рисунок 4 – Относительная износостойкость лап культиватора:
1 - серийная из стали 65Г; 2 - ПР-НХ17; 3 - ПР-Х4ГСП; 4 - мех. смесь ПР-НХ17(40%)
и ПР-Х4ГСП(60%)**

Как видно из рисунка 4 напыление рабочих органов культиваторов предложенным порошкообразным материалом позволяет существенно увеличить ресурс лап культиватора.

Эксплуатационные испытания подтверждают вывод об эффективности упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин предложенным порошкообразным материалом. Исследуемые покрытия показали относительную износостойкость равную 3,4 по сравнению с серийно выпускаемой лапой из стали 65Г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 2337178 С23С 4/08 Бюл. №30 27.10.08 г. Порошкообразный материал для напыления износостойких покрытий. Патентообладатель ОрелГАУ. Хромов В.Н., Корнев В.Н., Зайцев С.А.
2. Зайцев С.А., Поляков П.А. Газопламенное упрочнение и восстановление лап культиватора.// Надежность и ремонт машин: Сборник материалов 2-ой Международной научно-технической конференции. – Орел: Изд-во ОрелГАУ, 2005. – 446с., ил., с.158-163.
3. Мурзаев В.П. Восстановление деталей газопламенным напылением и наплавкой порошковых материалов. Проспект ВНПО «Ремдеталь». – М.: ЦНИИТЭИ Госагропрома СССР. 1986 – 12 с.
4. Веденянин Г.В. Общая методика экспериментальных исследований и обработка опытных данных. - М.: Колос, 1973. - 199 с.
5. Зайцев С.А. Упрочнение и восстановление лап культиваторов газопламенной наплавкой. // Ресурсосбережение-XXI век: Сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Орел: Изд-во ОрелГАУ, 2005. – 416 с., ил., с.48-53.
6. Хромов В.Н., Зайцев С.А., Храпоничев Д.Н., Коняев К.А. Физико-механические свойства газонапыленных покрытий укрепленных лап культиваторов. Известия ОрелГТУ. Серия Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. -№2/266 (532). 2007.-138 с.; 45-49 с.
7. Кугель Р.В. Ускоренные ресурсные испытания в машиностроении. – М.: Знание, 1969. – 134с.
8. Статические методы обработки эмпирических данных. – М.: Издательство стандартов. 1978. – 254с.

Хромов Василий Николаевич

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г.Орел
Доктор технических наук, зав. кафедрой «Надежность и ремонт машин», профессор
Тел.: (4862) 431979; факс: (4862) 454079;
E-mail: chrom@orel.ru

Зайцев Сергей Александрович

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г.Орел
Ст. преподаватель кафедры «Надежность и ремонт машин»
Тел.: (4862) 544528;
E-mail: serjft@mail.ru

Е. В. ЖИЛЬЦОВ

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОАБРАЗИВНОГО ШЛИФОВАНИЯ

В данной статье рассмотрен процесс формирования микрогеометрии поверхности заготовки в ходе электроабразивного шлифования. Приведена математическая модель описывающая зависимость получаемой величины шероховатости поверхности от технологических параметров.

Ключевые слова: микрогеометрия поверхности, электроабразивное шлифование, шероховатость поверхности, технологические параметры.

The process of forming micro geometry surface blank by electrochemical grinding is considered in this article. Mathematical model describing dependence of value of surface roughness on technological parameters is presented.

Key words: micro geometry of surface, electro abrasive grinding, roughness of a surface, technological parameters.

По мере развития машиностроения улучшаются эксплуатационные характеристики применяемых материалов, шире используются стали и сплавы, которые сохраняют высокие прочностные свойства при высоких температурах. Обработка этих материалов на металлорежущих станках связана с рядом трудностей. Поэтому в настоящее время ведется интенсивный поиск не только новых видов материалов, но и новых методов обработки. К таким методам относится и электроабразивное шлифование (ЭАШ). ЭАШ представляет собой комбинированный процесс, при котором съём металла с заготовки осуществляется в результате одновременно протекающих процессов анодного растворения и механического резания абразивными зёрнами. Кроме того, в результате воздействия электролита происходит адсорбционное понижение прочности обрабатываемого металла вследствие уменьшения межфазной поверхностной энергии. Благодаря отсутствию сплошного контакта дискретных контактирующих поверхностей заготовки и инструмента, а также выступанию зёрен абразива из связки, между ними образуется зазор, заполненный электролитом. В зазоре под воздействием электрического тока происходит анодное растворение металла заготовки. Таким образом, поверхность заготовки при ЭАШ формируется в результате протекания электрохимического процесса и механической работы круга, производимой абразивными зёрнами, которые удаляют продукты анодного растворения и срезают обрабатываемый материал, а также выполняют роль депассиваторов, разрушая и удаляя плёнку окислов металла, образующуюся на поверхности заготовки. Исходя из этого одним из основных критериев оценки электроабразивного шлифования является величина шероховатости поверхности.

При моделировании микрогеометрии поверхности заготовки на стадии ЭАШ исходили из того, что сформированная при резании абразивными зёрнами наибольшая высота неровностей профиля R_{max0} нивелируется в результате анодного растворения металла заготовки. При этом из-за разности зазоров между кругом и заготовкой вершины неровностей растворяются быстрее, чем происходит съём металла во впадинах профиля, что и приводит к уменьшению высоты неровностей (рисунок 1).

$$R_{max} = R_{max0} + \Delta R_{впад} - \Delta R_{верш}$$

где R_{max0} – наибольшая высота неровностей профиля заготовки при абразивном шлифовании, мкм; $\Delta R_{впад}$, $\Delta R_{верш}$ – изменение высоты неровностей профиля в результате анодного растворения металла заготовки соответственно во впадинах и на вершинах выступов, мкм:

$$\Delta R = V_p \cdot t;$$

V_p – скорость растворения металла заготовки, мкм/с; t – время образования на заготовке риски от абразивного зерна, с.

Тогда

$$R_{\max} = R_{\max 0} - \left(\frac{v_{\text{верш}}}{\rho} - V_p^{\text{над}} \right) \cdot t \quad (1)$$

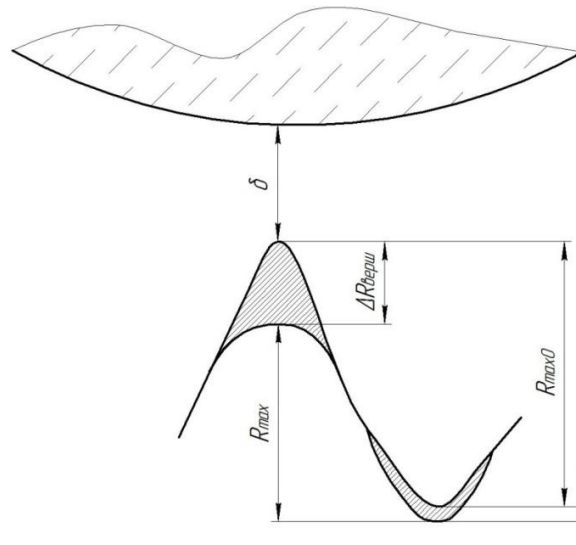


Рисунок 1 – Схема формообразования микрогеометрии заготовки в процессе ЭАШ

Известно, что скорость электрохимического растворения металла заготовки можно определить по формуле [1]:

$$V_p = \frac{k_v \cdot \chi \cdot \eta \cdot (U - \Delta\varphi)}{\delta}, \quad (2)$$

где k_v – объемный электрохимический эквивалент материала заготовки, $\text{см}^3/(\text{А} \cdot \text{мин})$; χ – удельная проводимость электролита, $\text{см}/\text{м}$; η – выход металла по току; U – напряжение на электродах, В; $\Delta\varphi$ – сумма электродных потенциалов, В.

Подставив формулу (2) в зависимость (1), окончательно получим выражение для определения высоты неровностей профиля поверхности заготовки на стадии ЭАШ

$$R_{\max} = R_{\max 0} - \frac{k_v \cdot \chi \cdot \eta \cdot (U - \Delta\varphi)}{10^{-8}} \left(\frac{1}{\delta} - \frac{1}{\delta + R_{\max 0}} \right) \cdot t, \quad (3)$$

для нахождения $R_{\max 0}$ воспользуемся [2]:

$$R_{\max 0} = \frac{121 \cdot \rho^{-0,25} \cdot t_{\phi}^{0,5}}{\left(k_{\epsilon} \frac{m_p - m_n}{m_0} \cdot \frac{V_K}{V_{\text{п.п.}}} \cdot D_K^{0,5} \cdot H \cdot q \cdot \left(0,62 \frac{N}{V} \right)^{-2} \cdot F_c \right)^{0,5}};$$

ρ – радиус скругления вершин абразивных зерен, мкм; t_{ϕ} – фактическая глубина резания, мм; k_{ϵ} – коэффициент, учитывающий влияние колебаний рабочей поверхности круга относительно обрабатываемой поверхности заготовки:

$$k_{\epsilon} = 1 - 0,7 \cdot \frac{A_K}{t_{\phi}};$$

A_K – амплитуда колебаний круга, мкм; m_p – число зерен на рабочей поверхности круга, вершины которых претерпели частичное разрушение в процессе правки круга; m_n – число зерен, не взаимодействовавших с правящим инструментом; m_0 – максимально возможное число зерен на периферии круга; V_K – окружная скорость круга, м/с; $V_{\text{п.п.}}$ – скорость продольной подачи, м/мин; H – параметр, учитывающий многократное взаимодействие рассматриваемого участка поверхности заготовки с кругом:

$$H = \frac{1}{V_{\text{п.п.}} \cdot l_3};$$

q – отношение числа режущих вершин к числу абразивных зерен на рабочей поверхности круга; V – объемное содержание зерен в круге, %; F_c – суммарное распределение вершин зерен по глубине рабочей поверхности круга; t – время образования на заготовке риски от абразивного зерна, с:

$$t = \frac{l}{1000 \cdot V_K};$$

l – длина дуги контакта круга с заготовкой, мм [3]:

$$l = \left(1 - \frac{V_{п.п.}}{V_K}\right) \cdot \sqrt{D_K \cdot t_\phi};$$

где D_K – диаметр шлифовального круга, мм.

В конечном итоге формула выглядит следующим образом:

$$R_{max} = \frac{121 \cdot \rho^{-0,25} \cdot t_\phi^{0,5}}{\left(\left(1 - 0,7 \cdot \frac{A_k}{t_\phi}\right) \frac{m_p - m_n}{m_0} \cdot \frac{V_K}{V_{п.п.}} \cdot D_K^{0,5} \cdot \frac{1}{V_{п.п.} \cdot l_z} \cdot q \cdot \left(0,62 \frac{N}{V}\right)^{-2} \cdot F_c \right)^{0,5}} \cdot \frac{k_v \cdot \chi \cdot \eta \cdot U - \Delta\varphi}{10^{-8}} \left(\frac{1}{\delta} - \frac{1}{\delta + R_{max0}} \right) \cdot \frac{\left(1 - \frac{V_{п.п.}}{V_K}\right) \cdot \sqrt{D_K \cdot t_\phi}}{1000 \cdot V_K} \quad (4)$$

Для пересчета наибольшей высоты неровностей профиля R_{max} поверхности заготовки, полученной по математической модели (4), в среднее арифметическое отклонение профиля R_a можно воспользоваться зависимостью из [2]:

$$R_a = 0,15 \cdot R_{max}.$$

Адекватность разработанной математической модели формирования микрогеометрии поверхности заготовки на стадии ЭАШ проверяли путем сопоставления результатов расчета по зависимости (4) с результатами экспериментальных исследований.

На рис. 2 представлены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных шероховатости для условий электроабразивного шлифования заготовки из стали 12ХНЗА кругом 1 125×16×20 25А40СМ15К50А2, с окружной скоростью $V_K = 35$ м/с, скоростью продольной подачи $V_s = 0,6$ м/мин, при варьировании напряжения U в пределах от 4 до 10 В, при использовании в качестве электролита раствор 1М NaClO₄ водно-формамидный – 20% Н₂О. При этом расхождение данных не превышает 10%.

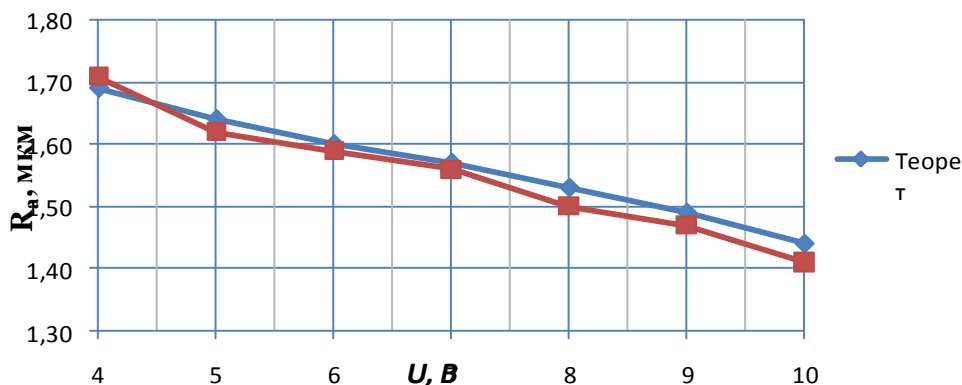


Рисунок 2 – Влияние напряжения U на шероховатость поверхности заготовки по параметру R_a

В результате численного моделирования процесса формообразования микрогеометрии поверхности заготовки на стадии ЭАШ установлено, что с увеличением напряжения происходит более интенсивное изменение наибольшей высоты профиля ΔR_{max} (рисунок 3).

Причем чем меньше зернистость шлифовального круга, тем на большую величину ΔR_{\max} уменьшится исходная высота неровностей профиля заготовки.

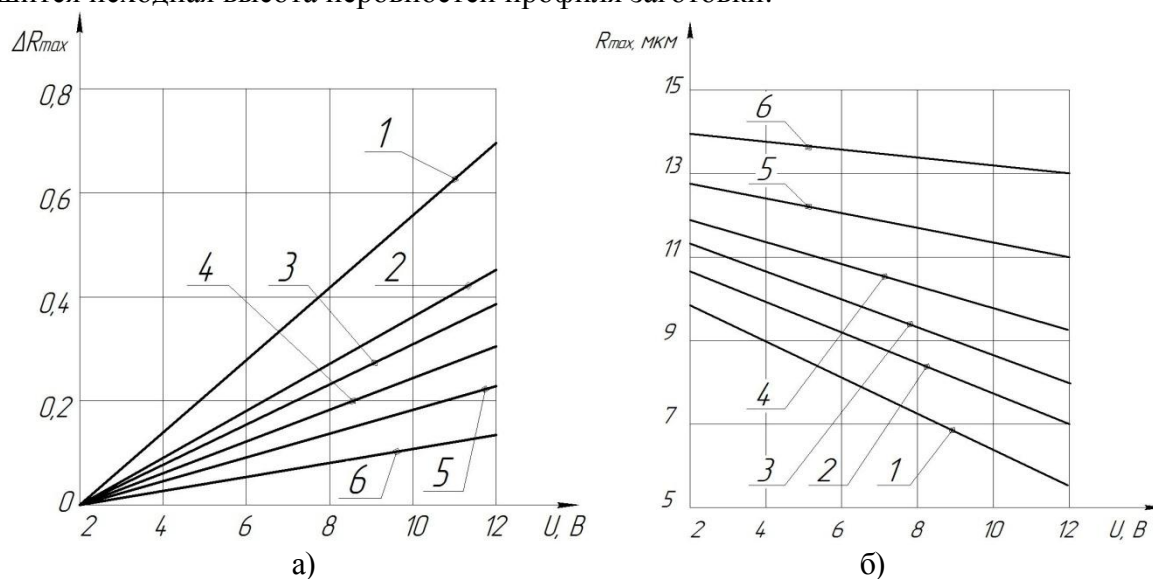


Рисунок 3 – Влияние напряжения U на изменение а) наибольшей высоты неровностей профиля ΔR_{\max} и б) на наибольшую высоту неровностей профиля R_{\max}
1, 2, 3, 4, 5, 6 – зернистость круга соответственно $N = 20; 25; 32; 40; 50; 63$

$R_{\max 0}$ формируемая только при абразивном воздействии на заготовку. Очевидно, это связано с тем, что с уменьшением зернистости круга становится меньше и зазор δ между кругом и заготовкой. В результате этого интенсифицируется анодное растворение металла заготовки и в большей степени нивелируются неровности на ее поверхности.

Если же зернистость шлифовального круга увеличивать, то будет уменьшаться скорость растворения металла заготовки и на итоговую шероховатость по параметру R_{\max} преобладающее влияние станет оказывать воздействие со стороны абразивных зерен круга (рисунок 3, б). В результате этого даже при увеличении напряжения U степень уменьшения высоты неровностей замедлится.

Следовательно, для повышения качества поверхности заготовки на стадии ЭАШ необходимо осуществлять обработку шлифовальными кругами как можно меньшей зернистости (из допустимых значений) при приложении максимально возможного напряжения.

Таким образом, проведенное исследование позволило выявить математическую зависимость величины шероховатости после электроабразивного шлифования от технологических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки// Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон и др.; Под общ. Ред. В.А. Волосатова. - Л.: Машиностроение. Лепингр. отд-ние, 1988. – 719 с.
2. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании: Монография, - М: Машиностроение, 2004. – 144.
3. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. М., Машиностроение, 1974. – 320с.

Жильцов Евгений Владимирович

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк

Аспирант кафедры «Технологии машиностроения»

Тел. (4742)32-81-86

E-mail: evgeniy-zhiltsov@yandex.ru

УДК 621.9

Д.В. МОИСЕЕВА, А.А. ЕМЕЛЬЯНЕНКО, Ю.Н. ПОЛЯНЧИКОВ

АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИНСТРУМЕНТ В РОССИИ: ПРОИЗВОДСТВО И РЫНОК НАЧАЛА XXI ВЕКА

Работа посвящена исследованию современного состояния производства и рынка абразивных материалов и инструмента в России: дан обзор основных проблем и тенденций. Показаны наиболее значимые и необходимые предпосылки к созданию условий эффективного развития отечественного абразивно-инструментального производства. Представлены перспективные направления в производстве абразивных материалов и инструмента.

Ключевые слова: абразивные материалы, инструмент, производство, рынок, инновации, контроль, мотивация, стандарты, консалтинг, модернизация, производительность.

The job is devoted to research of a modern condition of manufacture and market of abrasive materials and tool in Russia: the review of the basic problems and tendencies is given. The most necessary and important preconditions to creation of conditions of effective development domestic of abrasive tool manufacture are shown. The perspective directions in manufacture of abrasive materials and tool are submitted.

Key words: abrasive materials, tool, manufacture, market, innovations, control, motivation, standards, consulting, modernization, productivity.

Основным направлением совершенствования промышленной продукции является повышение качества и снижение затрат на ее производство. В машиностроении высокое качество выпускаемой продукции обеспечивается абразивной обработкой, которая обеспечивает повышение точности размеров и формы изготовления деталей машин, позволяет снизить шероховатость поверхностей, улучшает структуру поверхностного слоя металла, служит задачам дизайна (матовые, блестящие и прочие поверхности), делает возможным обработку новых труднообрабатываемых материалов и т.д.

В мировом инструментальном производстве наблюдается тенденция к дальнейшему увеличению скоростей резания, обеспечению гибкости и удобства эксплуатации инструмента, повышению его стойкости, переходу на экономичные методы обработки металлов. Переход от шлифования к твердому точению с использованием пластин кубического нитрида бора и поликристаллических алмазов поставил новые задачи перед инструментальщиками. Появились новые марки инструмента с прогрессивными покрытиями, обеспечивающими повышение точности и чистоты поверхности на токарных операциях, исключающих последующее шлифование. Это позволяет сократить время обработки детали, получить экономию смазочно-охлаждающей жидкости, уменьшить энергозатраты. Одновременно принимаются меры по созданию удобных и гибких систем крепления заготовок и инструмента. Замена обработки абразивным инструментом обработкой лезвийным инструментом с высоким качеством поверхности вызывает снижение доли шлифовальных станков в станочном парке [1]. Но полностью исключить финишную обработку из технологических процессов все же невозможно. Ведь после абразивной обработки, в особенности тонкой, на поверхности деталей образуется наклеп, благодаря которому повышается твердость обработанной поверхности, и, как следствие, увеличивается износостойкость деталей машин. Перед современными производителями стоит задача постоянного совершенствования абразивного инструмента с целью получения максимального эффекта от абразивной обработки.

Определяющим фактором в процессе окончательной обработки является абразивный инструмент, производство которого в России сопряжено с множеством проблем. В данной статье сделана попытка анализа проблем современного абразивно-инструментального производства.

Абразивно-инструментальное производство является подотраслью инструментальной промышленности. Ее основными потребителями являются предприятия автомобильного, авиационного, станкостроительного машиностроения, судостроения, радиотехнической промышленности, топливно-энергетического, нефтегазового, строительного комплексов, заводы по производству техники для химических комплексов. Развитие производства абразивных инструментов происходит в сильной зависимости от колебаний как в инструментальной промышленности, так и в отраслях-потребителях. В электронной печати [2, 3] рассматриваются направления и тенденции развития инструментального производства России. Абразивно-инструментальное производство, существуя в рамках инструментальной отрасли, имеет ряд особенностей.

Советский период характеризуется появлением и становлением абразивного производства в России. В отличие от производства лезвийного инструмента, которое располагалось практически на всех крупных заводах в форме подразделений – инструментальных хозяйств, для производства абразивного инструмента создавались крупные специализированные абразивные заводы. Абразивные заводы старались располагать вблизи природных месторождений абразивных материалов, источников электроэнергии. Так, выбор места строительства Волжского абразивного завода во многом был обоснован наличием хорошей сырьевой базы: источником кварцевого песка явился Орловский карьер на правом берегу Волги, источником нефтекокса – Волгоградский нефтеперерабатывающий завод, а близость Волжской ГЭС стала гарантией обеспечения производства электроэнергией. Благодаря мощному росту объемов машиностроения, абразивно-инструментальное производство на долгие годы было обеспечено заказами.

Период перестройки и все 90-е годы очень болезненно сказались на производстве абразивных инструментов. Практически все абразивные заводы были поставлены под угрозу разорения и для того, чтобы выжить в создавшихся условиях, продавали по частям свои площади, оборудование, а потом просто прекращали существование. Одним из факторов, обеспечивших выживание предприятий, стала востребованность российских абразивных материалов и инструментов за рубежом.

Начало 2000-х годов характеризуется возобновлением роста в машиностроении, благодаря чему несколько улучшилась ситуация в производстве абразивных инструментов: появились заказы, стала возможна частичная модернизация основных производственных фондов и автоматизация производственных процессов, начали внедряться новые системы управления бизнесом. К середине 2000-х происходит замедление темпов роста в машиностроении, ситуация снова обостряется. Происходит ужесточение конкуренции со стороны зарубежных производителей абразивных инструментов, на российский рынок приходят не только европейские, но и юго-восточные производители.

В 2008 году начался спад во всех машиностроительных отраслях, который обусловлен мировым финансовым кризисом. Предсказать окончание кризиса и его последствия на сегодняшний день не берутся даже ведущие аналитики. Первоначально моментом достижения «дна» кризиса назывался март 2009 года, позднее эту перспективу передвинули на конец 2009 – начало 2010 года. Ясно только одно, что кризис окажет сильное негативное воздействие на всю промышленность и обрабатывающие производства окажутся в более жестких условиях, чем добывающие.

Итак, осложнившаяся экономическая обстановка является основной проблемой вставшей перед абразивно-инструментальным производством России. Российские производители абразивных инструментов ориентируются не только на внутренний рынок, но и активно внедряются на рынки стран СНГ, Европы, США и Юго-восточной Азии. В случае дальнейшего развития неблагоприятной ситуации в Европе и США возможно существенное увеличение продаж продукции на рынках Юго-Восточной Азии.

На российском рынке абразивных инструментов представлена продукция отечественных, европейских и юго-восточных производителей. Но основной действующей

силой все же являются местные производители. Европейские абразивные инструменты значительно превосходят отечественные по качеству и цене, но далеко не все потребители готовы переплачивать за высокое качество. Доля абразивного инструмента юго-восточных производителей не велика. Эта продукция отличается низкой ценой, наличием большого количества производителей, рекордно сжатыми сроками проектирования и изготовления, агрессивной маркетинговой политикой и невысоким качеством. Как отмечает генеральный директор ОАО "Лужский абразивный завод" Вадим Борисов, «производство абразивного инструмента – это одна из немногих российских отраслей, куда не пустили китайцев» [4]. Китайские производители не могут конкурировать с российскими по качеству продукции, поэтому пытаются захватить рынок с помощью подделок, используя к тому же запрещенные материалы и занижая при этом стоимость на величину до 15%. В случае, если руководство предприятий не учитывает реальных потребностей производства в качественном инструменте и желает сэкономить средства, то закупка осуществляется у юго-восточных производителей. В итоге незначительная экономия на закупке дешевых инструментов оборачивается значительными убытками, возникающими из-за устранения брака, невыдерживания режимов резания, сокращения реального срока службы инструмента по сравнению с нормативным, срывом сроков изготовления продукции.

Российская продукция несколько уступает европейским аналогам по качеству, но соотношение цены и качества делают ее вполне конкурентоспособной не только на внутреннем, но и на внешнем рынке. Для обеспечения стратегических целей государства необходима независимость от зарубежных производителей, поэтому в качестве конкурентного преимущества российских производителей можно рассматривать наличие государственного заказа.

В 2007 году выпуск товаров и услуг по предприятиям отрасли (производство абразивного и алмазного инструмента) составил 5 млрд. 959 млн. рублей (без НДС), что составляет 105% к уровню 2006 года, в том числе по абразивным предприятиям - 5 млрд. 722 млн. рублей, что соответствует темпу роста 104,3% к 2006 году [5]. По оценке ОАО «ВАЗ», внутренний рынок абразивного инструмента отечественного производства на керамической связке составляет 17...79 тысяч тонн в год, абразивного инструмента на бакелитовой связке 23...26 тысяч тонн в год. Импорт абразивного инструмента в Россию не велик. В 2004 году он составил менее 10% внутреннего потребления [6]. Основными производителями абразивного инструмента на территории России являются Лужский абразивный завод, Волжский абразивный завод, Косулинский абразивный завод, Златоустовский абразивный завод, ИСМА, компания «Абразивные заводы Урала», Пермский абразивный завод и Белгородский абразивный завод. Динамика долей рынка ведущих производителей абразивных инструментов в России отражена в отчетности ОАО «Косулинский абразивный завод» [7] и управляющей компании «Абразивные заводы Урала» [8].

Лидером отрасли является ОАО «Лужский абразивный завод»: за прошедшие десять лет его доля увеличилась с 31,3% до 60%. Треть всей продукции завода идет на экспорт в США, Германию, Грецию, Финляндию и т.д. Основная продукция – абразивный инструмент на бакелитовой и керамической связке (отрезные круги, шлифовальные круги, полировальные круги, зачистные круги, лепестковые круги, шлифовальные бруски и сегменты) для обработки широкого круга материалов и для различного оборудования, а также огнеупорные изделия. Выручка предприятия по итогам 2006 года составила 2,9 млрд. рублей (в 2005 году – 2,5 млрд. рублей), чистая прибыль – 700 млн. рублей (в 2005-м – 500 млн. рублей) [4].

Достойную конкуренцию ОАО «ЛАЗ» составляет ОАО «Волжский абразивный завод». Его доля на рынке колеблется в пределах 16...17%. Большую часть продукции ОАО «ЛАЗ» (80%) составляет абразивный инструмент на бакелитовой связке [9], в то время как 80% выпуска ОАО «ВАЗ» составляет инструмент на керамической связке [10].

В сентябре 2007 года ОАО «ВАЗ» перешел в собственность индийской фирме CUMI International Limited. В настоящий момент CUMI лидирует в производстве абразивных

материалов в Индии и обладает широким ассортиментом связанных абразивов. В качестве стратегических направлений совместного с CUMI бизнеса были выбраны освоение технологии переработки карбида кремния до высокого уровня качества на сырьевой базе ОАО «ВАЗ» и расширение производства абразивного инструмента. Стратегия фирмы CUMI подразумевает создание единой производственно-технологической оси взаимосвязанных производств на территории Индии, Китая и России в противовес промышленным отраслевым концернам, расположенным в Европе и США. При этом научно-лабораторная основная база должна располагаться в Индии, промышленная обкатка инновационных идей также будет проводиться на предприятиях CUMI в Индии, а затем уже исходя из рыночной целесообразности переноситься на промышленные площадки в Китай и РФ [10].

Подобные объединения сложно оценить однозначно. С одной стороны, предприятие будет стабильно работать и развиваться, у него появятся средства на модернизацию и освоение новых продуктов. Но, с другой стороны, неизвестно, будут ли заинтересованы новые владельцы в поставке продукции завода на российский рынок по доступным ценам или полностью ориентируются на зарубежных потребителей. Еще один сложный аспект - это внедрение наукоемких продуктов и технологий: планируется научно-техническую базу оставить в Индии, а российский завод сделать промышленной площадкой. Развитие российской науки остается без производственной базы, что, безусловно, скажется на ее уровне. Да и стратегическим национальным интересам это в ущерб. Также возможна «утечка» российских специалистов за рубеж.

Следующей по значимости в отрасли идет компания «Абразивные заводы Урала» - ей удалось к 2001 году увеличить долю на рынке до 17,4%, опередив ОАО «ВАЗ». Удержать занятые позиции не удалось - и в 2005 году доля рынка сократилась до 14,2 %. По отдельным отзывам можно сделать вывод, что в 2007-2008 годах доля рынка компании продолжала сокращаться. Компания представляет собой объединение семи предприятий абразивно-инструментального производства: ОАО «Челябинский абразивный завод», ЗАО «Росси», ОАО «Челябинский опытный завод», ООО «Челябинский текстильный комбинат», торговый дом «Абразивные заводы Урала», ОАО «УралНИИАШ» и ОАО «Кыштымский абразивный завод». Целями создания этой компании являются организация научно-промышленного комплекса с единым технологическим циклом, внедрение новых информационных технологий в управлении, развитие эффективной системы обмена информацией и расширение доли компании на рынке [11]. Объединение усилий отдельных предприятий позволило добиться существенного эффекта: в 2006 году произведено товарной продукции на 810 млн. рублей с НДС. Рост по отношению к 2005 году составил 95%. Общий выпуск товаров и услуг составил 1017 млн. рублей, что соответствует 97% роста к 2005 году. Результаты деятельности предприятий вне компании скорее всего были бы менее успешными. Деятельность компании сопряжена со многими трудностями, свойственными абразивно-инструментальному производству. Важным достижением компании является создание разветвленной дилерской сети, которая способствует сбыту продукции компании.

ОАО «Косулинский абразивный завод» производит широкий ассортимент абразивного инструмента на бакелитовой связке и керамической связке, но ужесточение конкуренции и другие сложности привели к сокращению доли рынка предприятия с 11,6% в 1999 году до 7,2% в 2006 году. В 2001 году на заводе разработана уникальная технология производства кругов горячего прессования для рельсошлифовальных поездов, не имеющая аналогов в России, но это все равно не помогло предприятию восстановить потерянные позиции.

На долю остальных производителей абразивных инструментов в России приходится менее 10%.

Итак, рынок абразивных инструментов в России характеризуется невысоким уровнем конкуренции со стороны зарубежных производителей, наличием одного крупного, сильного игрока (ОАО «ЛАЗ»), ориентированного как на внешний, так и на внутренний рынок, одного игрока, имеющего большие перспективы (ОАО «ВАЗ»), и около пятнадцати производителей,

которым свойственен типичный перечень проблем современных российских промышленных предприятий.

Как уже было сказано ранее, сильное влияние на деятельность всех промышленных предприятий окажет разразившийся мировой экономический кризис. И если у крупных производителей будет возможность переориентироваться на более стабильные (пока) азиатские рынки, то мелкие производители, ориентированные в основном на российский рынок, могут оказаться на грани банкротства из-за отсутствия заказов, вызванного общим спадом в промышленности.

Проблема получения заказов также обостряется отсутствием грамотной маркетинговой политики на большинстве предприятий. Производить то, что востребовано рынком, и чутко реагировать на изменение потребностей потребителей предприятия не научились. Из легко доступных маркетинговых инструментов освоены лишь совершенствование упаковки и этикетки, гибкая ценовая политика, система скидок, работа Интернет-сайтов, участие в специализированных выставках. Первое подробное маркетинговое исследование рынка абразивных инструментов было выполнено только в конце 2008 года. Очень перспективным направлением совершенствования деятельности представляется изучение потребностей потребителей, разработка на его основе новых видов продукции, а также разработка систем лояльности.

Для обеспечения конкурентоспособности, которая является залогом успешного функционирования и развития любого предприятия, заводам по производству абразивных инструментов необходимо постоянно совершенствовать свою продукцию. На рынке необходимо предлагать действительно инновационные решения, которые помогут потребителям решить проблему достижения высокого качества и минимальных издержек. Решая проблемы потребителей, предприятия приобретают лояльных клиентов, которые в последствии обеспечивают 80% выручки.

В Советском Союзе инструментальное производство было одним из самых наукоемких производств. Несмотря на все сложности, в стране продолжали проводиться научные исследования в области создания и усовершенствования абразивного инструмента. Например, на кафедре машиностроения Волгоградского государственного технического университета был создан и запатентован электрокорундовый абразивный инструмент без связки, который не имеет аналогов в мире. Применение этого инструмента позволяет повысить точность, качество и производительность обработки [12]. Однако промышленного освоения этого инновационного продукта, как и большинства других, сделано не было.

Отсутствие интереса производителей абразивных инструментов к внедрению инноваций можно объяснить не только недалекостью, отсутствием стратегической ориентированности руководства предприятий, но и рядом объективных причин:

- изношенное и морально устаревшее оборудование. Средний уровень износа в отрасли около 50%. На морально устаревшем оборудовании невозможно производить инновационную продукцию в промышленном масштабе. Это также вызывает снижение качества продукции и производительности труда, повышение уровня производственного травматизма, повышенный расход средств на ремонтные нужды для поддержания оборудования в рабочем состоянии;

- отсутствие квалифицированных рабочих, инженерных и управленческих кадров. На сегодняшний день наблюдается катастрофическое падение популярности рабочих специальностей, которое в первую очередь связано с низким уровнем заработной платы в отрасли. Молодежь не идет работать на заводы. По данным компании «Абразивные заводы Урала», около 30% работающих их предприятий – пенсионеры, еще 17% работников предпенсионного возраста. Отсутствует преемственность поколений, передача опыта. Уровень текучести кадров на предприятиях компании около 50%, то есть за год на заводах сменяется около половины всех работников. Эта картина характерна для всего абразивно-инструментального производства. Особую сложность представляет набор персонала в случае закупки современных станков с ЧПУ, ведь для их обслуживания требуются

высококвалифицированные специалисты. Поставить к современному станку можно только хорошо обученного рабочего, а кого обучать, если за год сменяется половина работников? Причем обучение зачастую может организовать только сам завод, закупивший прогрессивное оборудование, потому что лишь немногие училища, техникумы и вузы имеют современную производственную базу и могут подготовить студента к работе с ней. Последний фактор обуславливает и слабую подготовку инженерных кадров. Современным предприятиям приходится тратить большие средства на подготовку квалифицированных кадров. Хорошо подготовленные управленческие кадры, как не странно, тоже редкость. Вузы страны пока не наработали достаточно эффективных методик, подготовка менеджеров также ложиться на плечи предприятия;

– закрытость некоторых технологий и дополняющего их программного обеспечения заставляет российских производителей приобретать технологически целостные конечные продукты у западных фирм. Для нормальной работы станков с ЧПУ необходимо специализированное программное обеспечение. Стоимость пакета таких программных продуктов может составлять от 10 до 25% от стоимости самого оборудования. При этом зачастую, приобретая высокотехнологическое оборудование и программное обеспечение зарубежного производства, пользователи сталкиваются со сложностью свободной эксплуатации “дуэта” станок – программное обеспечение. Для комплексного решения этой проблемы необходимо создание отечественных САПР абразивного инструмента, обеспечивающих полную взаимосвязь между конструктором, технологом и оператором станка с ЧПУ, что при условии достаточного образования позволяет объединить их в одном лице. Решить эту проблему в нашей стране из-за отсутствия достаточного финансирования научно-исследовательских работ в отрасли машиностроения, включающей в себя область инструментальных технологий крайне сложно [13];

– недостаток инвестиционных средств для пополнения оборотных средств, технического перевооружения, выпуска инновационной продукции. Собственных средств у большинства предприятий нет: величина получаемой прибыли невелика, продажа непрофильных активов не приносит значительных доходов. Получение заемных средств по действующим кредитным ставкам сильно сказывается на рентабельности предприятий и может послужить причиной банкротства. В связи с кризисом финансовой сферы возможность получения кредита значительно уменьшилась. Государственные кредиты и дотации являются очень желательным, но практически нереальным средством решения данной проблемы.

В динамичной бизнес-среде руководству современных абразивно-инструментальных производств приходится решать массу текущих, повседневных проблем:

– снижение объемов производства, вызванное давлением конкурентов и общим спадом промышленности;

– наличие избыточных производственных площадей, оставшихся с советского периода, которые требуют значительных средств на содержание;

– низкая загрузка действующих производственных мощностей, вызванная сокращением заказов, и также вызывающая дополнительные затраты;

– наличие претензий к качеству продукции и процесса ее реализации (неудовлетворительные эксплуатационные характеристики продукции, пересортица, нарушение сроков отгрузки, неправильное оформление сопроводительных документов);

– нестабильное качество и ритмичность поставок сырья, используемого в производстве;

– рост цен на сырье и энергоресурсы, вызывающий повышение затрат на производство продукции;

– наличие на рынке контрафактной продукции, которая наносит непоправимый урон репутации предприятий.

Для обеспечения выживания и создания конкурентных преимуществ любому предприятию нужен стратегический план грамотного, комплексного, эффективного

технического перевооружения, который должен содержать не только проекты долгосрочного характера, но и прописанные процедуры постоянных улучшений, касающихся качества, себестоимости и технологии изготовления продукции. Постоянное совершенствование текущей деятельности подготовит почву для осуществления крупных проектов, которые без предварительной подготовки производства и работающих на нем людей могут стать губительными для предприятия в целом. Для решения этой задачи в российской индустрии абразивного инструмента можно предложить следующие действия:

1) в области проектирования выпускаемой продукции и технологии ее производства:

- использование новых абразивных материалов;
- совершенствование конструкции абразивного инструмента;
- применение систем автоматизированного проектирования;
- применение при проектировании продукции научных подходов и методов оптимизации;
- разработка новых методов абразивной обработки;
- освоение новых видов оборудования;
- автоматизация процессов абразивной обработки;

2) в области менеджмента:

- применение научных подходов и методов;
- развитие маркетинговых исследований;
- выявление конкурентных преимуществ предприятия;
- разработка стратегических направлений деятельности предприятия;
- совершенствование систем учета, контроля, анализа расходования материальных ресурсов;
- внедрение методов «бережливого производства» (Lean Production). Преимущество Lean Production в том, что система на 80% состоит из организационных мер и только 20% составляют инвестиции в технологию;
- пересмотр политики в отношении с персоналом, разработка эффективных мотивационных систем. Руководству необходимо осознать, что современный наемный работник – это не просто исполнитель, это человек, способный к совершенствованию среды вокруг себя, в том числе и производственной.

При активном соблюдении перечисленных мер российское абразивно-инструментальное производство составит достойную конкуренцию мировым производителям, станет одним из важнейших звеньев полной цепи изготовления российской высококачественной и технологичной машиностроительной продукции, получит перспективу стабильного долгосрочного развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стельмах, Е. Россия на мировом рынке металлообрабатывающего инструмента – [Электронный ресурс] – Режим доступа. - http://www.rmo.ru/ru/nmoborudovanie/nmoborudovanie/2004-2/29_34_ob2.pdf
2. Разумов-Раздолов, К., Дорофеев, И. Специальная технологическая оснастка и инструмент. Перспективы развития проектирования и производства – [Электронный ресурс] – Режим доступа. - http://www.rmo.ru/ru/nmoborudovanie/nmoborudovanie/2006-4/58_59_ОТА_04_06.pdf
3. Разумов-Раздолов, К., Хуршудян, А. Инструментальное производство в России. Прошлое, настоящее и будущее – [Электронный ресурс] – Режим доступа. - http://www.rmo.ru/ru/nmoborudovanie/nmoborudovanie/2007-2/32_39_ОТА_02_07.pdf
4. Бычина, И., Новикова, Ю. Поставщики контрафакта крутят абразивные диски под маркой Лужского завода – [Электронный ресурс] – Режим доступа. - <http://www.kadis.ru/daily/dayprof.phtml?id=40779&PrintVersion=1>
5. Годовой отчет ОАО «Белгородский абразивный завод» за 2007 год – [Электронный ресурс] – Режим доступа. - <http://www.belabraziv.ru/fin/baz1227875107.zip>
6. ОАО «Волжский абразивный завод»: крепкий как кремень – [Электронный ресурс] – Режим доступа. - www.region.ru

7. Ежеквартальные отчеты эмитента эмиссионных ценных бумаг ОАО «Косулинский абразивный завод» – [Электронный ресурс] – Режим доступа. - www.Kosulino-abraziv.ru
8. Годовой отчет УК «Абразивные заводы Урала» – [Электронный ресурс] – Режим доступа. – <http://www.azu.ru/arh/yprarx.zip>
9. Материалы сайта ОАО «Лужский абразивный завод» - www.abrasives.ru
10. Годовой отчет ОАО «Волжский абразивный завод» за 2007 год – [Электронный ресурс] – Режим доступа. - <http://www.vabz.ru/otchet.php>
11. Презентация компании «Абразивные заводы Урала» – [Электронный ресурс] – Режим доступа. - http://www.azu.ru/arh/prezentaciya_azu.zip
12. Емельяненко, А.А., Моисеева, Д.В. Особенности технологии изготовления электрокорундового абразивного инструмента без связи// Современные проблемы машиностроения. Труды IV Международной научно-технической конференции.– Томск: Издательство ТПУ, 2008. – 666 с.
13. Перспективы изготовления качественного режущего инструмента в условиях российской промышленности - [Электронный ресурс] – Режим доступа. - <http://www.tvintos.ru/catalog/news/prod.php?rc=1149159689&pc=1213102715>

Моисеева Дарья Викторовна

старший преподаватель кафедры менеджмента, маркетинга и организации производства
Волгоградский государственный технический университет
400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28
Телефон: 8-8442-24-81-32 (рабочий), 8-8442-69-94-55 (домашний)
E-mail: Moiseeva-D@yandex.ru

Емельяненко Алексей Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения
Волгоградский государственный технический университет
400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28
Телефон: 8-8442-62-66-15 (рабочий), 8-905-39-65-861 (мобильный)
E-mail: emelyanenko@vstu.ru

Полянчиков Юрий Николаевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения
Волгоградский государственный технический университет
400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28
Телефон: 8-8442-24-84-29 (рабочий), 8-8442-23-15-05 (домашний)
E-mail: techmash@vstu.ru

УДК 621.787.4

В.А. ГОЛЕНКОВ, С.Ю. РАДЧЕНКО, Д.О. ДОРОХОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ВАЛКОВОЙ ШТАМПОВКИ

Рассмотрены особенности математического моделирования упрочняющей валковой штамповки. Приводится описание математической модели. Представлены результаты моделирования в виде картины напряженного состояния и изменения параметра Удквиста с ростом числа проходов.

Ключевые слова: упрочнение, валковая штамповка, математическая модель, метод конечных элементов, параметр Удквиста.

Special feature of mathematical design by the method of hardening rolls stamping has been considerate in this work. The mathematical design will be compared there. The results of the mathematical design has been present as a picture of tension state and change by Odqvist parameter with growth of the number of passages.

Key words: hardening, rolls stamping, mathematical design, finite element method (analysis), Odqvist parameter.

Процессы обработки металлов давлением сложны и многообразны, разработка новых схем и технологии в данной области - весьма дорогостоящие проекты. При этом не всегда гарантирован положительный экономический эффект и возможность реального использования в производстве. Отсюда возникает необходимость построения и исследования математических моделей того или иного процесса. На современном этапе развития технологии моделирования ведущие позиции занимает метод конечных элементов (МКЭ).

На данный момент актуально исследование процессов интенсивной пластической деформации и упрочняющих технологий поверхностной пластической обработки с точки зрения их математического моделирования. Так, процесс упрочняющей валковой штамповки (ВШ) основывается на комплексном локальном деформировании очага деформации и сочетает в одном технологическом процессе интенсивную пластическую деформацию (ИПД) и поверхностную пластическую деформацию (ППД), что предопределяет преимущество его использования в машиностроении для создания осесимметричных изделий с качественно новыми эксплуатационными свойствами. На рисунке 1 представлена одна из возможных схем упрочняющей ВШ для получения осесимметричных изделий с градиентной от наружной поверхности структурой. [1, 2]

Расчетная схема моделируемого процесса представлена на рис. 2. После внедрения инструмента 2 в тело заготовки по траектории 4а он поднимается. Деформацию осуществляет валковая матрица 3 по пути 5. Затем формирующий инструмент 2 перемещается согласно 4б, и операции повторяются. После прохождения рабочей длины заготовки инструмент начинает перемещаться в противоположном направлении, таким образом моделируется возвратно-поступательное перемещение заготовки 6.

Математическое описание процесса проводили с использованием вариационного принципа [3]:

$$\begin{aligned} \iiint_{V(t)} \delta \nabla \mathbf{v} \cdot (\mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\sigma} - \mathbf{d} \cdot \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\omega} + \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{w} + (\nabla \cdot \mathbf{v}) \boldsymbol{\sigma}) dV = \\ = \dot{\mathbf{Q}} \cdot \delta \dot{\mathbf{q}} + \iint_{S(t)} \delta \mathbf{v}_t \cdot (\mathbf{p} + \mathbf{p}(\nabla \cdot \mathbf{v} - \mathbf{n} \cdot \mathbf{d} \cdot \mathbf{n})) dS, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$, \mathbf{d} , $\boldsymbol{\omega}$ – тензоры истинного напряжения Коши, деформации скорости и вихря;
 \mathbf{p} , \mathbf{n} - давление и внешняя нормаль, относящиеся к актуальной поверхности контакта $S(t)$;

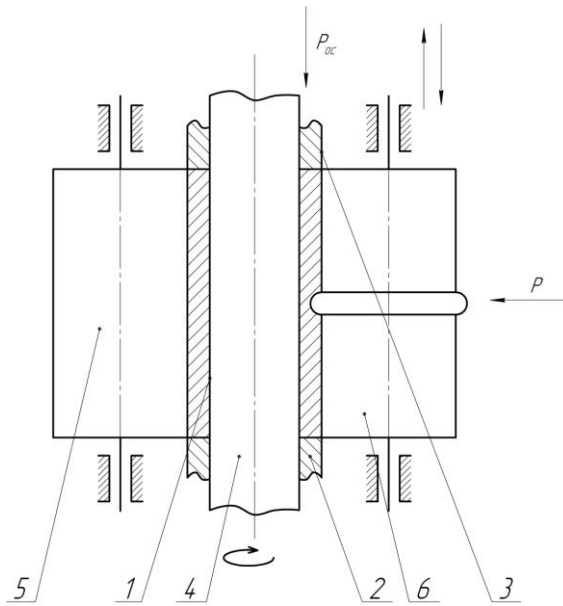


Рисунок 1 – Схема способа упрочняющей ВШ [1]:
1 - заготовка, 2 – упор, 3 – прижим, 4 – оправка, 5,6 – ролики.

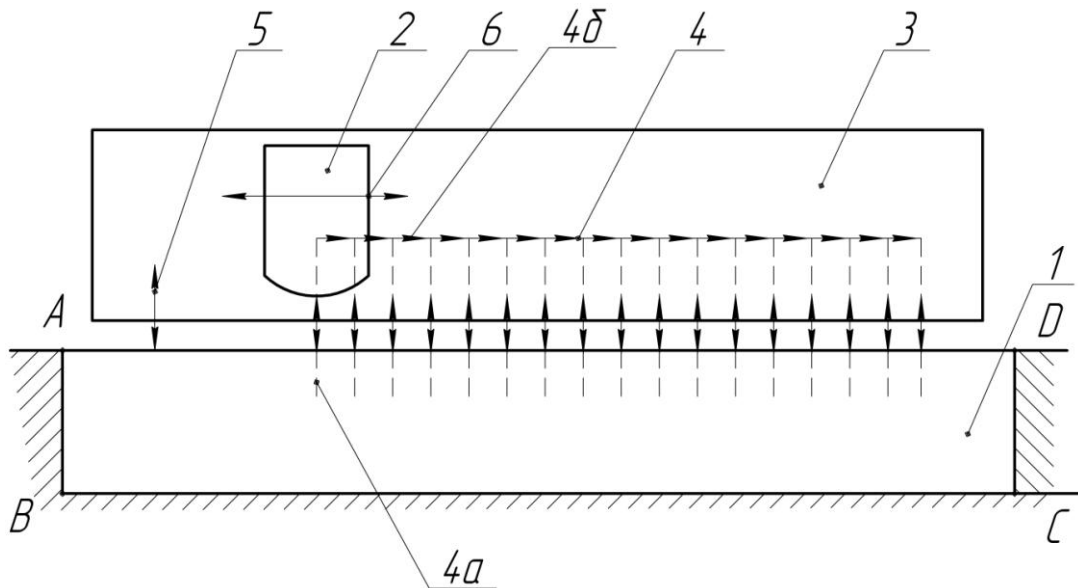


Рисунок 2 – Расчетная схема процесса упрочняющей ВШ:
1 – заготовка, 2 – инструмент; 3 – валковая матрица;
4 – траектория перемещения инструмента за один проход
(4a – единичный акт вдавливания; 4б – перемещения, соответствующие шагу h);
5 – траектория перемещения валковой матрицы за каждый единичный акт вдавливания 4a;
6 – возвратно-поступательное перемещение инструмента (число проходов n)

\dot{p} - скорость давления;

r - коротационная производная в определяющем соотношении для материала деформируемого тела;

$\nabla \cdot \mathbf{v}$ - градиент поля скорости;

$\dot{\mathbf{Q}}$ - скорости обобщённых сил;

$\delta \mathbf{v}_t$ - вариации скоростей скольжения по поверхности абсолютно жёсткого тела;

$\delta \dot{\mathbf{q}}$ - вариации обобщённых скоростей.

Тензоры деформации скорости, вихря определяются как:

$$\mathbf{d} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T),$$

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v}^T - \nabla \mathbf{v}).$$

Закон движения материальных точек задан в виде:

$$\dot{\mathbf{y}}(\mathbf{y}, t) = \mathbf{v}(\mathbf{y}, t).$$

Определяющее уравнение представляет собой уравнение пластического течения Прандтля - Рейсса, в котором материальная производная заменена коротационной, то есть используем следующую зависимость:

$${}^j \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{d},$$

где “ j ” - производная Яумана; тензор \mathbf{D} в глобальных декартовых координатах имеет вид:

$$D^{ijkl} = \begin{cases} E^{ijkl} - \frac{3GS^{ij}S^{kl}}{\bar{\sigma}^2(1+H'/(3G))} & \text{при активном нагружении} \\ E^{ijkl} & \text{при обратимом нагружении} \end{cases}$$

где E^{ijkl} – изотропный тензор упругости, S^{ij} – девиатор тензора напряжений, $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжения.

Условие перехода из упругого состояния в пластическое:

$$\bar{\sigma} = H(\xi_p), \tag{2}$$

где $H(\xi_p)$ – кривая упрочнения, ξ_p – параметр Удквиста.

В модели упругая деформация считается малой и используется аддитивное разложение скорости. Таким образом, принимается теория изотропного упрочняющегося материала с малой упругой деформацией. Эволюционное уравнение напряжённого состояния имеет вид:

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = {}^j \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\Omega} \cdot \boldsymbol{\sigma}.$$

Начальные условия, помимо исходного положения тел, формулируем как ненагруженность в момент времени $t=0$:

$$\boldsymbol{\sigma}|_{t=0} = 0, \mathbf{Q}|_{t=0} = 0.$$

Граничные условия в контактных задачах задаются неявно через закон трения. Принимается изотропный закон Кулона с постоянным коэффициентом k , связывающий нормальную \mathbf{p}_n и касательную \mathbf{p}_t компоненты давления:

$$|\mathbf{p}_t| \leq k|\mathbf{p}_n|. \tag{3}$$

Интегрирование (1) производится по объёму тела $V(t)$ и площади контакта $S(t)$, соответствующим моменту времени t . Модель, описываемая (1), представляет собой модификацию скоростного вариационного принципа, предложенного Л. А. Толоконниковым, О. Л. Толоконниковым, А. А. Маркиным и В. Ф. Астаповым, и разрешается с привлечением метода конечных элементов [3].

Деформированное состояние принимается плоским, так как возникает нормальное напряжение и отсутствует значительная деформация в направлении третьей оси. Использование изотропной модели материала с малой упругой деформацией оправдано, так как при упрочнении ВШ осуществляется циклическое или близкое к нему деформирование заготовки.

Для расчета упрочняющей ВШ были сформулированы следующие граничные условия:

- для узлов, касающихся формирующего инструмента и валковой (роликовой) матрицы (рисунок 1 - 5, 6 и рисунок 2 – 2, 3), запрещено перемещение внутрь инструмента и матрицы;
- для узлов, касающихся оправки и упора (рисунок 1 – 2, 3, 4 и рисунок 2 – ABCD), запрещены любые перемещения.

При обработке заготовки наибольшие напряжения и деформации возникают вблизи наружной поверхности. Исходя из этого, для получения качественной картины напряженно-деформированного состояния использовалась составная треугольная сетка, более густая на наружной поверхности заготовки. При этом достаточно рассмотреть участок определенной длины, а не всю заготовку, так как последнее значительно увеличит время расчета, не внося изменений в конечный результат.

Задача решается с помощью ППП «Штамп» [4] с использованием алгоритмов [3] и теории пластического течения.

Основное внимание уделено изучению влияния числа проходов на параметр упрочнения, как один из важнейших параметров накопления деформаций. Отсюда достаточно рассмотреть параметр Удквиста:

$$q = \int \overline{d\varepsilon}_i^P,$$

так как данная мера отражает накопленную пластическую деформацию.

Проведены эксперименты на идентичных заготовках с различным числом циклов обработки, глубина внедрения инструмента 2 (рисунок 2) 0,05мм, шаг 0,5мм, толщина заготовок 7,5мм. Рост параметра Удквиста с увеличением числа проходов n представлен на рисунок 3. Из анализа рисунка видно, что наибольшее увеличение наблюдается после 2-3 проходов, а устойчивый рост при 6-7 (что согласуется с работами [5,6]). В то же время изменение параметра Удквиста на участке 7-12 близко к изменению на участке 3-7, что доказывает эффективность упрочняющей ВШ. Вопрос о предельно допустимом числе проходов остается открытым, он требует разработки и апробации новых критериев разрушения при комплексном локальном нагружении очага деформации. В то же время на практике из-за несовершенства предварительной обработки поверхности, наличия дефектов предварительной истории нагружения или литейных с ростом числа проходов наблюдается «шелушение» поверхности, особенно вблизи торцов.

Таким образом, ставится задача о нахождении для каждого типа материала и размеров изделия оптимального числа проходов, как с точки зрения увеличения параметров упрочнения, так и с экономической (рост числа проходов ведет к увеличению себестоимости). При этом приведенная математическая модель позволяет наиболее полно ответить на вопросы, связанные со степенью упрочнения при определенном числе проходов для различных типов инструментов (рисунок 2 – 2) и марок металлов и сплавов, для этого необходимо внести соответствующие изменения в геометрию 2 (рисунок 2) и зависимости (2) и (3).

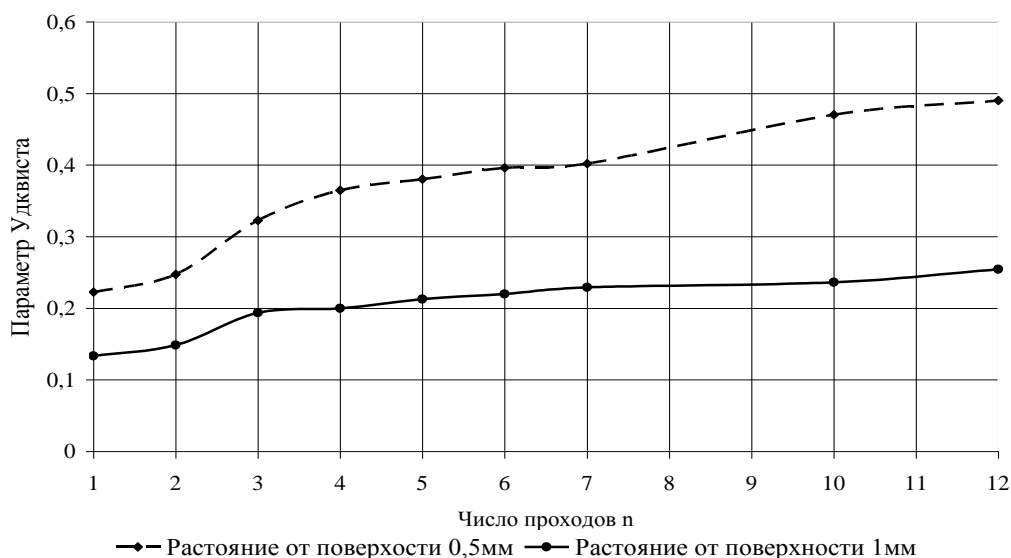


Рисунок 3 – Изменение параметра Удквиста с ростом числа проходов при упрочняющей ВШ на определенном расстоянии от поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ по заявке № 2007110990 от 26.03.07, решение о выдаче патента от 27.06.08. Способ получения металлических втулок [Текст] / Голенков В.А., Малинин В.Г., Радченко С.Ю., Короткий Г.П., Дорохов Д.О.
2. Голенков, В.А. Разработка конструкции экспериментальной установки для получения изделий с градиентными субмикро - и наноструктурными состояниями вещества на основе валковой штамповки [Текст] / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов // Известия ОрелГТУ. Серия: «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» – 2008-2/270(545). С.53-55.
3. Морев, П. Г. Вариант метода конечных элементов для контактных задач с трением [Текст] / П. Г. Морев // Известия РАН. Серия: «Механика твёрдого тела». - 2007. - №4. С. 168-182.
4. Голенков В. А., Радченко С. Ю., Тюков В. М. Пакет прикладных программ для моделирования процессов обработки металлов давлением. В сб.: Металлические материалы, методы их обработки. Тезисы докладов Российской научно-технической конференции. - Москва, МГАТУ, 1994.
5. Браславский, В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами [Текст] / В.М. Браславский. - М.: Машиностроение, 1975. -160с.
6. Голенков, В.А. Определение технологических параметров упрочняющей валковой штамповки ступенчатых тонкостенных осесимметричных изделий [Текст] / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Короткий Г.П. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2004. - №5.

Голенков Вячеслав Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
доктор технических наук, ректор, профессор
Тел. (4862) 420024,
E-mail: admin@ostu.ru

Радченко Сергей Юрьевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
доктор технических наук, проректор, профессор
Тел. (4862) 437125
E-mail: sur@ostu.ru

Дорохов Даниил Олегович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
аспирант кафедры «Автопласт»
Тел. (48646) 25689
E-mail: olorin84@mail.ru

УДК 621.774.6

С.И. ВДОВИН, В.Н. МИХАЙЛОВ, Н.В. ТАТАРЧЕНКОВ

ДЕФОРМАЦИИ ТРУБЫ ПРИ ГИБКЕ ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛОЙ

Установлено соотношение поперечных деформаций изогнутой трубы, зависящее от протяженности зоны активного деформирования и коэффициента цилиндрической анизотропии материала.

Ключевые слова: поперечная деформация изогнутой трубы, анизотропия материала.

The correlation of lateral deformations in a bent tube depending on the extension of an active deformation zone and the factor of material cylindrical anisotropy is defined.

Key words: lateral deformations of a bent tube, material anisotropy.

Схема гибки поперечной силой по копиру реализуется наиболее распространенными видами трубогибного оборудования [1, 2]. В процессе гибки участок заготовки, прилегающий к копиру, соседствует с зоной активного деформирования, в пределах которой кривизна оси трубы $1/R$ изменяется от нуля до значения $1/R_0$, заданного размерами копира. Для расчета деформаций в названной зоне используем полярные координаты ρ , α в сечении трубы и η – координатные линии, эквидистантные, ее изогнутой оси.

Формулы деформаций, содержащие перемещения u_ρ , u_α , u_η :

$$\begin{aligned} \varepsilon_\rho &= \frac{\partial u_\rho}{\partial \rho}, \\ \varepsilon_\alpha &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{u_\rho}{\rho}, \\ \varepsilon_\eta &= \frac{R}{R + \rho \sin \alpha} \frac{\partial u_\eta}{\partial \eta} + \frac{\sin \alpha}{R + \rho \sin \alpha} u_\rho + \frac{\cos \alpha}{R + \rho \sin \alpha} u_\alpha, \\ \gamma_{\rho\alpha} &= \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{u_\alpha}{\rho} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_\rho}{\partial \alpha}, \\ \gamma_{\alpha\eta} &= \frac{R + \rho \sin \alpha}{\rho R} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{u_\eta R}{R + \rho \sin \alpha} \right) + \frac{\rho R}{R + \rho \sin \alpha} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u_\alpha}{\rho} \right), \\ \gamma_{\eta\rho} &= \frac{R}{R + \rho \sin \alpha} \frac{\partial u_\rho}{\partial \eta} + \frac{R + \rho \sin \alpha}{R} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{u_\eta R}{R + \rho \sin \alpha} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

выведены из общих соотношений Ляме [3].

Уравнение кривизны оси трубы $1/R$ получаем на основе степенной функции упрочнения материала $\sigma_s = A\varepsilon^n$, выражая изгибающий момент

$$M = M_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^{1/m}$$

через известные граничные значения M_0 и R_0 , а также обратную величину показателя функции упрочнения $m = 1/n$. Считая момент пропорциональным расстоянию η , получаем уравнение изогнутой оси трубы

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} \left(\frac{\eta}{\eta_0} \right)^m, \quad (2)$$

содержащее координату η_0 границы зоны активного деформирования.

Принимаем $\partial u_\eta / \partial \eta = \rho \sin \alpha / R$ и записываем с учетом (2)

$$u_\eta = \frac{\eta \rho \sin \alpha}{(n+1) R}.$$

Дифференциальное уравнение, выражающее условие равенства нулю суммы линейных деформаций, содержит неизвестные u_ρ и u_α . Его решение относительно u_ρ получаем по аналогии с работой [4], используя варьируемый параметр v в функции перемещения u_α , которая в терминах вариационного метода называется подходящей.

Имея формулы перемещений, выражаем согласно (1) деформации и интенсивность деформаций сдвига

$$\Gamma = 2 \left[\varepsilon_\rho^2 + \varepsilon_\rho \varepsilon_\eta + \varepsilon_\eta^2 + 0,25 (\gamma_{\rho\alpha}^2 + \gamma_{\alpha\eta}^2 + \gamma_{\eta\rho}^2) \right]^{0,5}$$

Приравниваем нулю интеграл производной $\partial\Gamma^2/\partial v$, который вычисляется по объему зоны активного деформирования [4]. Чтобы избежать численного интегрирования, заменяем в формулах (1) радиус материального волокна $R + \rho \sin\alpha$ его средней величиной R , в итоге получаем формулу

$$v = \frac{-f_1 - \frac{k}{\bar{\eta}_0^2} f_2}{4f_1 + \frac{4k}{\bar{\eta}_0^2} f_3}, \tag{3}$$

где $f_1 = \bar{d}^6 + 4\bar{d}^3 - 5$, $f_2 = 2\bar{d}^6 + 9\bar{d}^4 - 20\bar{d}^3 - 36\bar{d} + 45 + 48 \ln \bar{d}$,

$f_3 = 5\bar{d}^6 + 18\bar{d}^4 - 8\bar{d}^3 + 27\bar{d}^2 - 72\bar{d} + 30 + 48 \ln \bar{d}$, $k = m^2 \left[\frac{m+1}{6} \right] \left[\frac{m-1}{6} \right]$.

Символы \bar{d} и $\bar{\eta}_0$ обозначают отношение наружного диаметра трубы к внутреннему и относительную величину протяженности зоны активного деформирования – η_0/d .

В таблице 1 приведены рассчитанные значения варьируемого параметра v , а также соответствующие отношения деформаций $\varepsilon_\rho/\varepsilon_\eta$, относящиеся к изгибу трубы с параметром $\bar{d}=1,1$

Таблица 1 – Соотношение деформаций $\varepsilon_\rho/\varepsilon_\eta$ в зависимости от размера зоны активного деформирования $\bar{\eta}_0$ и показателя n функции упрочнения материала

$\bar{\eta}_0$	1		2		4	
n	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2
v	-0,033	-0,087	-0,092	-0,170	-0,175	-0,223
$\varepsilon_\rho/\varepsilon_\eta$	-0,862	-0,772	-0,763	-0,634	-0,625	-0,544

Как и следовало ожидать, отношение линейных деформаций зависит от протяженности зоны активного деформирования $\bar{\eta}_0$. При уменьшении последней $\varepsilon_\rho/\varepsilon_\eta \rightarrow -1$; с увеличением $\bar{\eta}_0$ отношение $\varepsilon_\rho/\varepsilon_\eta \rightarrow -0,5$, т.е. приближается к значению, характерному для изгиба моментом. Соотношения ε_ρ и деформаций сдвига с относительным изменением длины материального волокна трубы ε_η иллюстрирует рисунок 1.

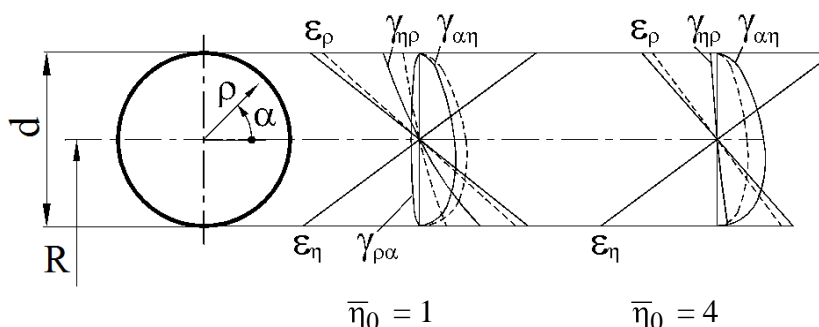


Рисунок 1 – Примеры эпюр деформаций тонкостенной трубы $R = 2d$; $0,5\pi \geq \alpha \geq -0,5\pi$; $n = 0,1$ и $0,2$ – сплошные линии и пунктир

Наиболее значимая деформация сдвига $\gamma_{\alpha\eta}$ соизмерима по своим численным значениям с линейными деформациями и остается таковой с увеличением протяженности зоны активного деформирования $\bar{\eta}_0$, когда прочие деформации сдвига исчезающе малы. Влияние показателя упрочнения материала n на эту деформацию неоднозначно: при $\bar{\eta}_0 = 1$ слабо упрочняющиеся материалы ($n = 0,2$) подвергаются деформации $\gamma_{\alpha\eta}$ в большей степени, чем интенсивно упрочняющиеся; при $\bar{\eta}_0 = 2$ картина обратная. Отношение $\gamma_{\rho\alpha}/\varepsilon_\eta$ не зависит от радиуса гибки, а отношения $\gamma_{\eta\rho}/\varepsilon_\eta$ и $\gamma_{\alpha\eta}/\varepsilon_\eta$ зависят – из-за множителя $R/(R + \rho\sin\alpha)$ в выражениях (1). Толщина стенки трубы t влияет на деформации $\gamma_{\rho\alpha}$ и $\gamma_{\eta\rho}$: их значения почти пропорциональны величине t/d .

Приведенные результаты относятся к трубам из материала с изотропными механическими свойствами. Введение коэффициента цилиндрической анизотропии μ приводит к более громоздкой формуле ν , чем (3). Расчеты свидетельствуют о незначительном влиянии μ на величину варьируемого параметра и соответственно – на соотношение поперечных линейных деформаций при малых $\bar{\eta}_0$ (порядка 1), таблица 2.

Таблица 2 – Соотношение деформаций $\varepsilon_\rho/\varepsilon_\eta$ в зависимости от показателей анизотропии и упрочнения материала при $\bar{d}=1,1$ и $\bar{\eta}_0 = 1$ (числитель) и $\bar{\eta}_0 = 2$ (знаменатель); ν – варьируемый параметр

μ	0,33		0,66	
n	0,1	0,2	0,1	0,2
$\varepsilon_\rho/\varepsilon_\eta$	-0,859	-0,755	-0,868	-0,798
	-0,743	-0,567	-0,791	-0,712
ν	-0,035	-0,097	-0,030	-0,071
	-0,104	-0,210	-0,075	-0,123

С увеличением $\bar{\eta}_0$ влияние μ существенно возрастает, рисунок 2.

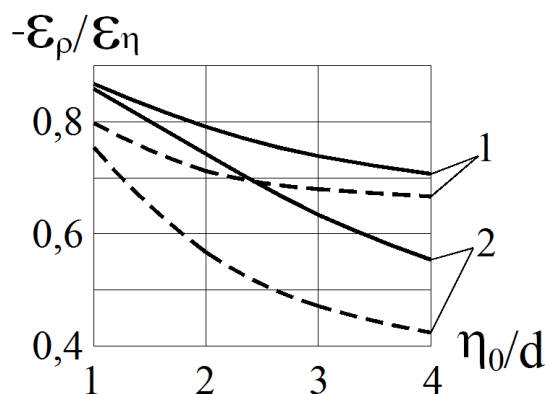


Рисунок 2 – Соотношение деформаций в зависимости от протяженности зоны активного деформирования при $\mu = 0,33$ (1) и $0,66$ (2) $n = 0,1$ (сплошная линия) и $0,2$ (пунктир)

Протяженность зоны активного деформирования η_0 рассчитывают исходя из схемы гибки и параметров настройки гибочного инструмента [1, 2]. Обычно она составляет около двух диаметров трубы. Увеличение η_0 приводит к уменьшению разнотолщинности стенки изогнутой трубы, однако при этом возрастает протяженность сопряжений тороидальных и цилиндрических участков трубопровода, а это означает снижение его геометрической точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вдовин С.И. Вариационная оценка утонения труб при гибке / Кузнечно-штамповочное производство, 2007, № 11. С. 6–8.
2. Вдовин С.И. Расчеты гибки труб /Заготовительные производства в машиностроении. Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства. 2008, № 2. С. 33–36.
3. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Metallurgia. 1980. – 456 с.
4. Вдовин С.И., Михайлов В.Н., Татарченков Н.В. Деформации трубы при гибке моментом /Известия ОрелГТУ. Серия “Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии”. №2/273(559) 2009. С.

Вдовин Сергей Иванович

Орловский государственный технического университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор
Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29
Тел.: (4862) 41-68-77 и 55-98-25
E-mail: avtopl@yandex.ru

Михайлов Валерий Николаевич

Орловский государственный технического университет, г. Орел
Доцент
Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29
Тел.: (4862) 41-98-59
E-mail: avtopl@yandex.ru

Татарченков Николай Владимирович

Орловский государственный технического университет, г. Орел
Заведующий лабораторией
Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29
Тел.: (4862) 41-98-35
E-mail: avtopl@yandex.ru

В.М. ДАВЫДОВ, Е.А. ЛЕДКОВ, А.В. ГИЛЬ, С.Н. ХИМУХИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ

Электроискровое легирование (ЭИЛ) – нестабильный, многопараметрический процесс, который при всех своих преимуществах, до сих пор, не нашел широкого применения в отечественной промышленности и за рубежом. В данной статье изложены результаты научно-исследовательской работы, направленной на изучение и стабилизацию процесса ЭИЛ. В работе рассмотрен ряд параметров, оказывающих наибольшее влияние на процесс ЭИЛ, а так же предложен метод одновременной регистрации электрических, звуковых и температурных сигналов, сигналов систем позиционирования, охлаждения и контроля газовой среды, в результате чего было предложено устройство, система управления которого использует принципы адаптивного управления и нейросетевого моделирования, позволяющее стабилизировать и управлять протеканием процесса.

Ключевые слова: электроискровое легирование, искровой процесс, адаптивная система управления, нейросетевое моделирование.

Electro spark alloying (ESA) is unstable and multivariate process have many merits but still doesn't find a wide use in native and foreign industry. There are research results, which concentrated at investigation and stabilization of ESA process. A list of parameters, which influence on ESA, was examine in this article, also was introduce the method of parallel registration of electric, temperature, sounds, targeting, cooling and composition of medium parameters. In results was designed the equipment with adaptive control system which uses neurocomputing principles and makes it possible to stabilize and control the ESA process.

Key words: electro spark alloying, spark process, adaptive control system, simulate a neuron network modeling.

В условиях дефицита и постоянно роста цен на высококачественные стали, отечественное машиностроение вынужденно использовать технологии, позволяющие получать покрытия на сталях обыкновенного качества, что позволяет экономить дорогостоящие материалы. К числу электрофизических методов использующих концентрированные потоки энергии (КПЭ) для получения покрытий на металлах и сплавах относится электроискровое легирование (ЭИЛ). Метод электроискрового легирования (ЭИЛ) основан на использовании эффекта электроэрозионного разрушения материала обрабатываемого электрода (анод) с последующим переносом его материала на обрабатываемый электрод - деталь (катод). При этом на поверхности детали формируется покрытие с измененной (вторичной) структурой и свойствами к которым относятся: толщина нанесенного слоя; текстура поверхности (шероховатость); микротвердость; сплошность и ряд других. По существующей технологической схеме для установления оптимальных режимов обработки и получения заданных свойств покрытия на детали, необходимо проведение определенного числа предварительных экспериментов (часто это число невозможно предугадать) с использованием электродов соответствующих составов. Но даже в этом случае качество покрытия на детали может заметно отличаться от качества, полученного в предварительном эксперименте. Основной причиной этого несоответствия является высокая чувствительность структуры покрытия к изменению параметров обработки, основными из которых являются температура, газовый состав среды, сила прижатия анода к катоду, режим работы генератора и скорости относительного перемещения электродов относительно друг друга, которые возможно контролировать только в условиях автоматизации процесса.

Исследования проводили на стенде, схема которого приведена на рисунке 1. В качестве генератора импульсов использовались серийно выпускаемые установки: Элитрон-22, Корона 1103 и Элитрон-52Б (в дальнейшем – соответственно установки 1, 2 и 3). Энергия одного импульса установки 1 и 2 примерно одинакова (0,06-0,08 Дж). Основное отличие параметров этих установок заключается в длительности импульса, которая составляет 200

мкс и 50 мкс соответственно. Момент возникновения искрового процесса, сопровождающийся световой вспышкой и звуком взрыва контактного мостика, фиксировали по появлению сигнала с фотодиода и микрофона, которые расположены непосредственно у места контакта. С целью визуализации процесса искрообразования проводилось фотографирование момента возникновения электроискрового процесса цифровыми фотокамерами Nikon Coolpix 4500 (с выдержкой 1/2000 с). В связи с недостаточной скоростью съемки для установления стадий развития процесса использовали две фотокамеры, закрепленные на окуляры бинокулярного микроскопа МБС 10. Используемые фотокамеры не имеют внешнего запуска и поэтому для определения момента фотографирования каждого фотоаппарата непосредственно за электродами располагали электроннолучевой осциллограф, работающий в ждущем режиме. Применение микроскопа позволило получать снимки с одной точки. В качестве материалов для электродов использовали образцы, изготовленные из проводниковой меди и сталей с различным содержанием углерода, в том числе и инструментальные стали (Р6М5 и ВК6). Для регистрации звука использовался микрофон МК-20 с усилителем.

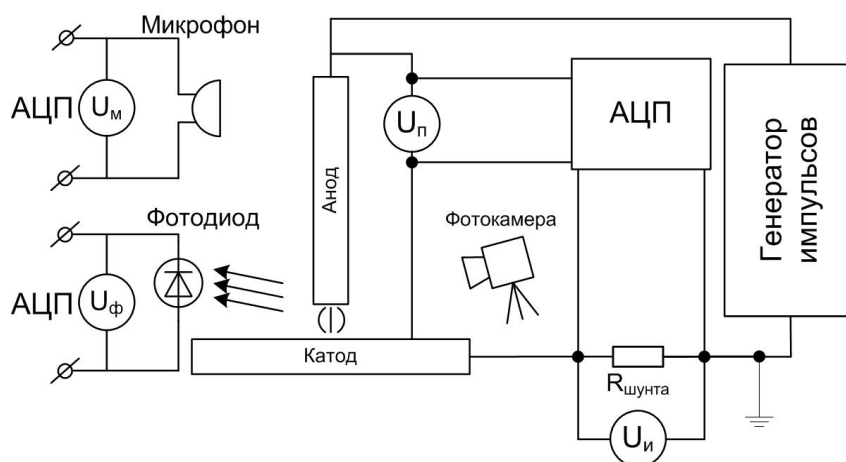


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Для регистрации светового излучения использовался фотодиод ФД – 3. Напряжение и ток, а также сигналы с фотодиода и микрофона записывались с помощью АЦП Е20-10 произведенный компанией L-card в персональный компьютер, где проводилась их обработка с использованием стандартных и специально разработанных компьютерных программ.

На рисунке 2, а, б приведены типичные сигналы, записанные с использованием АЦП. Как видно из полученных результатов с моментом появления импульса тока (А) совпадает импульс от фотодиода (Б). В различных экспериментах время задержки сигнала от фотодиода (U_{ϕ}) изменяется, но в предельном случае совпадает с максимумом тока генератора установки ($U_{и}$). Время задержки обусловлено различным сечением возникающего в момент искрообразования контакта и количеством расплавляемого однократным процессом материала. Причем фотодиод, учитывая ряд особенностей низковольтного ЭИЛ, фиксирует момент взрывного разрушения контакта, возникновение и продолжительность свечения плазменного облака (рисунок 2, в, г, д, е). Звуковой сигнал (Г) от микрофона ($U_{м}$) практически подтверждает указанный механизм процесса и, учитывая скорость распространения звука в воздухе, совпадает с U_{ϕ} по времени.

На этой кривой дополнительно виден импульс от электромагнитной наводки (В), который ранее обнаруживался нами при закрытом окне фотодиода в составе сигнала Б и сопровождает любой электроискровой процесс. Для повышения эффективности процесса ЭИЛ необходимо использование элементов автоматизации, что позволит оценить количество рабочих импульсов за заданный период обработки в реальном режиме времени. В связи с этим необходимо провести сравнительный анализ целесообразности использования для этого фотодиода или микрофона. Фотодиод должен быть строго ориентирован на место контакта электродов, он не зафиксирует импульсы света, возникающие с противоположной стороны электрода, особенно когда обработка проводится не заостренным концом электрода.

Дополнительно, электромагнитная наводка искажает сигнал, а эрозионные частицы, осаждаясь на поверхности его стеклянного окна, ухудшают эффективность регистрации светового сигнала. В тоже время одним из главных достоинств использования микрофона вместо фотодиода является низкая скорость звука в воздухе. Регистрация звуковых колебаний «отстает» от тока и напряжения на определенную величину, что исключает влияние наводок на микрофон, ведь электромагнитные процессы наводки к этому времени завершились. Кроме того, система регистрации звуковых колебаний, в отличие от системы регистрации светового излучения, имеет более простую конструкцию, низкую себестоимость и легко реализуется в производстве. Проблема внешних шумов решается с помощью специальных фильтров, которые ограничивают звуковые колебания по длине волны.

На рисунке 2, ж, з представлены графики распределения температур по длине электрода в зависимости от времени обработки, построенные по результатам, полученным методом яркостной пирометрии [1, 2] рисунок 2, и. Температура при ЭИЛ является главным параметром процесса, ее стабильностью определяются структура и свойства формируемого покрытия. Кроме этого нагрев электродов определяет количество окислов и степень обезуглероживания железоуглеродистых сплавов. При этом наиболее интенсивные изменения происходят в аноде, что обусловлено его меньшими размерами и, следовательно, более высокой температурой нагрева. Изменяя и регулируя температуру анода во время обработки в реальном режиме времени и используя средства автоматизации можно стабилизировать процесс, контролировать интенсивность образования окислов и обезуглероживания материала.

Согласно [3, 4, 5, 6, 7], газовый состав среды при ЭИЛ оказывает весомое влияние на процесс формирования покрытий и на их свойства, такие как массоперенос, толщина и структура слоя, наличие дефектов, окислов и других неметаллических включений. Например, экспериментально было установлено [4], что чем более инертна среда, тем больше материала анода перенесется на катод, а кислород воздуха, из-за образуемых окислов, способствует разрушению получаемого слоя, но, согласно последним исследованиям [8], полное исключение кислорода из зоны обработки нецелесообразно, так как это сводит массоперенос к нулю. Согласно этим же данным [8] для стабильного и качественного протекания процесса ЭИЛ необходим определенный, оптимальный, состав среды, который будет разным для различных материалов и условий обработки. Все это подтверждает тот факт, что состав среды является важным технологическим параметром протекания процесса ЭИЛ и осуществления постоянного контроля, над этим параметром, возможно только в условиях автоматизированной, адаптивной системы управления.

Другим важным параметром ЭИЛ является режим работы генератора импульсов и системы позиционирования. Режим работы подразумевает совокупность следующих параметров: частота следования импульсов, энергия единичного импульса, длительность искрового процесса, фронт нарастания импульса, частота вибрации или частота вращения анода и другие. Известно, что эрозия анода и привес катода зависит от числа импульсов проходящих через искровой промежуток [9], и эта зависимость носит нелинейный характер [10, 11, 12 и др.]. Значение силы тока и напряжения определяют энергию единичного импульса, а так же суммарную энергию, относящуюся к единице площади обрабатываемой поверхности. С ростом числа импульсов, приходящихся на единицу площади за определенный промежуток времени массоперенос вначале растет, затем, через определенное время, становится обратным, затем снова прямым. Скорость, с которой прямой массоперенос сменяется обратным, зависит от частоты следования импульсов, чем она выше, тем изменения происходят быстрее, но параллельно с этим увеличивается энергия, весомая часть которой идет на нагрев анода и катода, причем анод греется сильнее в силу своих размеров. Температура анода может достигать до 600-2000°C [13], что видно на рисунке 2, ж, з. Увеличение температуры ведет к усилению окисления электродов и газовой коррозии [14].

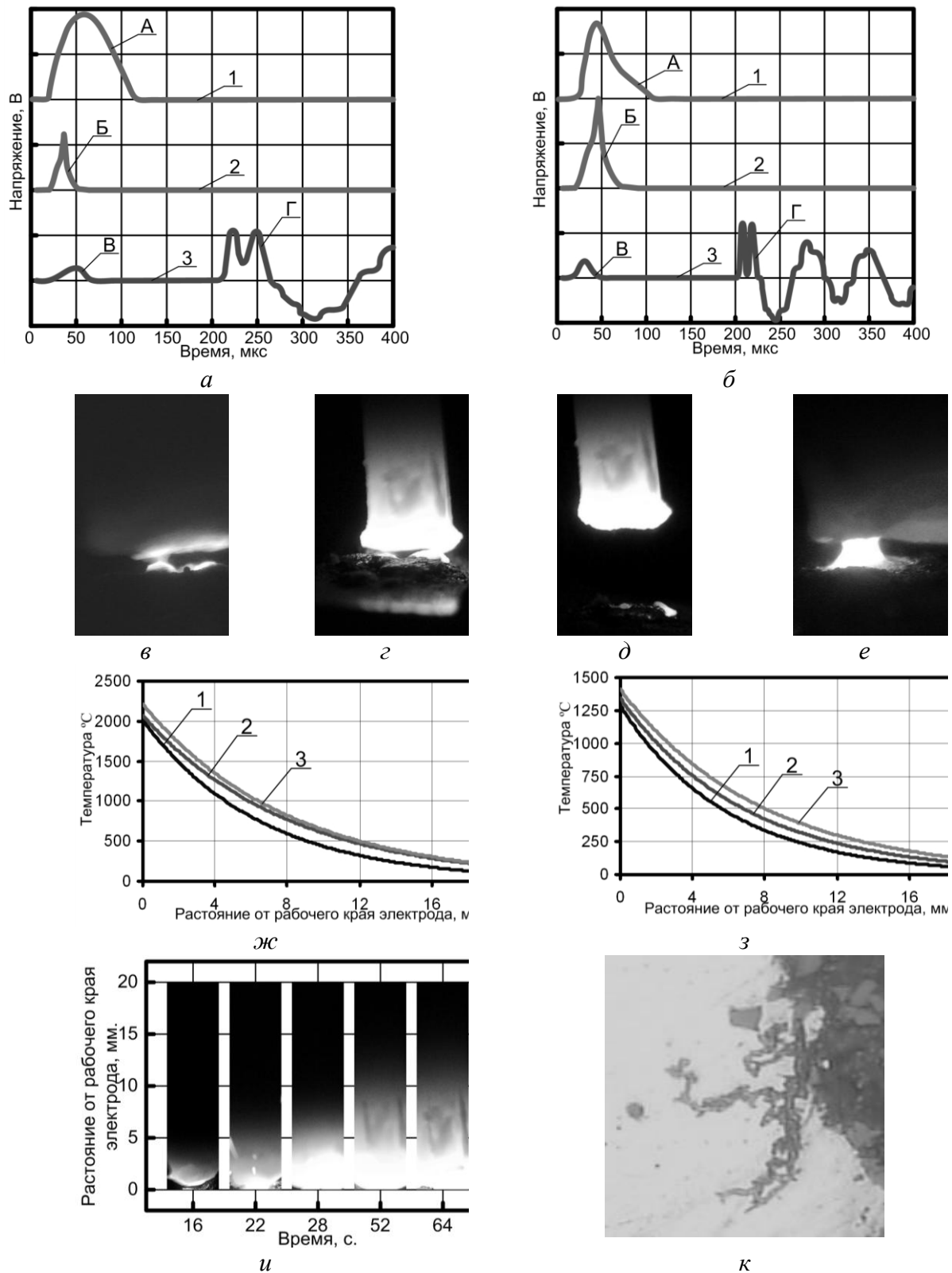


Рисунок 2 – а – сигналы Элитрон 22А; б – сигналы Короны; в, з, д, е – различных стадий процесса; ж – распределение температур по длине анода из ВК6; з – распределение температур по длине анода из Р6М5; и – распределения теплового поля по длине электрода во времени; к – окислы возникающие в теле анода при длительном тепловом воздействии

Под системой позиционирования подразумевается перемещение анода по трем или по пяти координатам в зависимости от типа обрабатываемой детали. Влияние скоростей

перемещения электродов относительно друг друга очевидно, ведь чем быстрее двигается анод, тем меньше искровых разрядов успевают произойти, но степень нагрева снижается, при относительно медленной скорости, число импульсов приходящихся на единицу площади растет, но это в свою очередь может привести перегреву детали и усилению процессов окисления и коррозии. Сила, с которой анод прижимается к катоду, влияет на количество рабочих импульсов, чем сила выше, тем рабочих импульсов больше, но, при этом, происходит рост температуры. Кроме этого, дальнейшее увеличение силы прижатия приводит к залипанию электродов, а следовательно к снижению эффективности процесса ЭИЛ. Поэтому, для определения оптимальной силы прижатия электрода, необходимо проводить дополнительные исследования или применять методы адаптивного управления.

Рассмотренные выше параметры прямо или косвенно влияют на эффективность процесса ЭИЛ, следовательно, если реализовать систему управления данными параметрами это позволит стабилизировать и автоматизировать процесс ЭИЛ. Ниже представлена модель устройства для ЭИЛ система управления которого основывается на принципах адаптивного управления и нейронном моделировании и учитывает все особенности процесса, описанные выше.

Устройство, изображенное на рисунке 3, включает в себя неподвижный катод (деталь), подвижный анод (инструмент), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), акустическую и электрическую системы слежения, систему слежения за температурой анода, систему позиционирования, систему подачи газов, систему подачи охлаждающей жидкости, регулируемого генератора импульсов и специализированный программный комплекс.

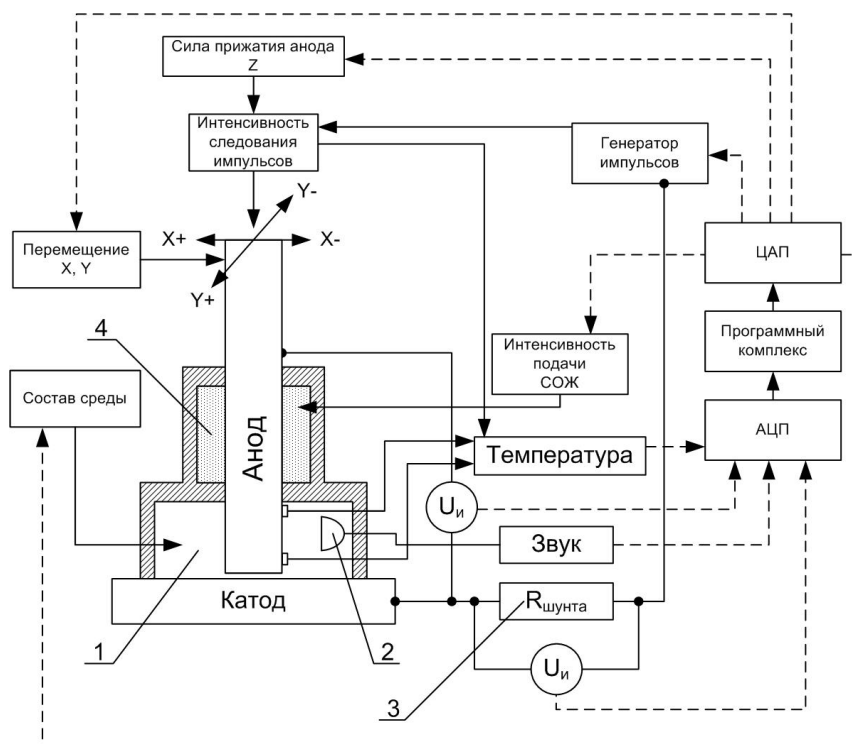


Рисунок 3 – Устройство для ЭИЛ

Все следящие системы устройства работают в реальном режиме времени и пересылают получаемую информацию на АЦП, который в свою очередь работает со специально разработанным программным комплексом.

Работа устройства начинается с ввода исходных данных обработки и желаемого результата в программный комплекс. На основе экспертной базы данных, собранной на стадиях экспериментов и изучения работ других исследователей, выбираются наиболее подходящие параметры обработки, такие как режим работы генератора импульсов, подача инструмента, подача охлаждающей жидкости, сила прижатия электрода, а так же состав газовой среды. Сразу же после начала обработки акустическая, термическая и электрическая

системы слежения регистрируют значения тока, напряжения, температуры электрода в двух или трех точках и звуковых сигналов из области с контролируемой газовой средой 1. Полученная информация, через аналого-цифровой преобразователь, поступает на компьютер, где обрабатывается при помощи программного комплекса, в основе которого лежат принципы нейросетевого моделирования и искусственного интеллекта. Процесс регистрации и обработки данных происходит в режиме реального времени.

В процессе электроискровой обработки, в результате взрыва токопроводящего мостика, возникает звуковая волны определенной частоты, которая регистрируется акустической системой слежения, и на основе этих данных происходит отделение рабочих импульсов от нерабочих и импульсов короткого замыкания. Кроме того, при помощи программного комплекса, происходит подсчет общей энергии всех импульсов, а так же полезной энергии рабочих импульсов.

Обладая подобной информацией, нейросетевая модель управления производит оценку эффективности процесса ЭИЛ, фактически определяя коэффициент полезного действия (КПД). Известно [15], что для создания единицы площади покрытия, заданной толщины, необходимо затратить определенное количество энергии. Так же известно [15], что за равные промежутки времени на единицу площади может приходиться различное число рабочих импульсов. Эта величина зависит от множества факторов, наиболее весомые из которых: сила прижатия электрода, скорость перемещения анода относительно катода, газовый состав среды, материал катода и анода и др. Описываемое устройство решает данную проблему за счет того, что позволяет контролировать число рабочих импульсов приходящуюся на единицу площади. Контроль над количеством рабочих импульсов происходит следующим образом: как только система отслеживает отклонение КПД от определенного значения, сразу поступает сигнал на корректирующие подсистемы, которые вносят поправку и выравнивают значения КПД. К корректирующим системам относят: 1. Система позиционирования, которая регулирует перемещение по осям координат (рисунок 3.), за счет чего регулируется сила прижатия анода к катоду (ось Z рисунок 3), которая влияет на количество рабочих импульсов, кроме того, система может изменить скорости перемещения по осям X и Y, другими словами замедлить или ускорить перемещение анода относительно катода, тем самым уменьшить или увеличить число рабочих импульсов на единицу площади обрабатываемой поверхности; 2. Регулируемый генератор импульсов способен изменять частоту следования импульсов, а так же увеличивать или уменьшать их энергию.

Таким образом, происходит управление процессом ЭИЛ. К недостаткам данного устройства можно отнести нагрев анода, увеличивая число рабочих импульсов в единицу времени, мы разогреваем анод до высоких температур, порядка 600 – 2000°C, что приводит к необратимым изменениям в структуре материала анода, а так же к активному его окислению [13, 14]. Для контроля температуры анода, в устройстве, предусмотрена соответствующая система слежения и система охлаждения. Посредством двух или трех термопар происходит отслеживание температуры анода в определенных точках. По этим точкам, используя методику, описанную в [1, 2], программный комплекс определяет распределения температур по длине в любой момент времени и в соответствии с этими данными контролирует температуру посредством системы охлаждения, не допуская образования окислов и нежелательных структурных превращений.

Кроме всего прочего, данное устройство позволяет контролировать газовый состав среды при ЭИЛ. Ведь как говорилось выше, состав газа существенно влияет на ряд параметров ЭИЛ: таких как массоперенос, окисление, свойства получаемого слоя и др. Контроль осуществляется при помощи системы подачи газов, благодаря чему, в изолированном от воздуха пространстве создается область избыточного давления, с заданным составом среды.

Все системы данного устройства управляются при помощи специального программного комплекса, использующего принципы нейронного моделирования, которая постоянно следит за процессом и корректирует его в нужное время. Кроме того, данная

система постоянно самообучается и пополняет свою базу данных, тем самым сводя погрешность своей работы к минимуму.

Метод нейросетевого моделирования, эмитирует работу человеческого мозга и является прикладной областью математики, специализирующейся на проектировании искусственных нейронных сетей (НС).

Как известно [16], в нейросетевом моделировании используются принцип параллельной обработки сигналов, который достигается путем объединения большого числа нейронов в так называемые слои и соединения определенным образом нейронов различных слоев, а так же, в некоторых конфигурациях, и нейронов одного слоя между собой, причем обработка взаимодействия всех нейронов ведется послойно.

Очевидно, что процесс функционирования НС зависит от величин синоптических связей, поэтому, задавшись определенной структурой НС, отвечающей какой-либо задаче, разработчик сети должен найти оптимальные значения всех переменных весовых коэффициентов. Этот этап называется обучением НС, и от того, насколько качественно он будет выполнен, зависит способность сети решать поставленные перед ней проблемы во время эксплуатации. На этапе обучения кроме параметра качества подбора весов важную роль играет время обучения. Как правило, эти два параметра связаны обратной зависимостью и их приходится выбирать на основе компромисса.

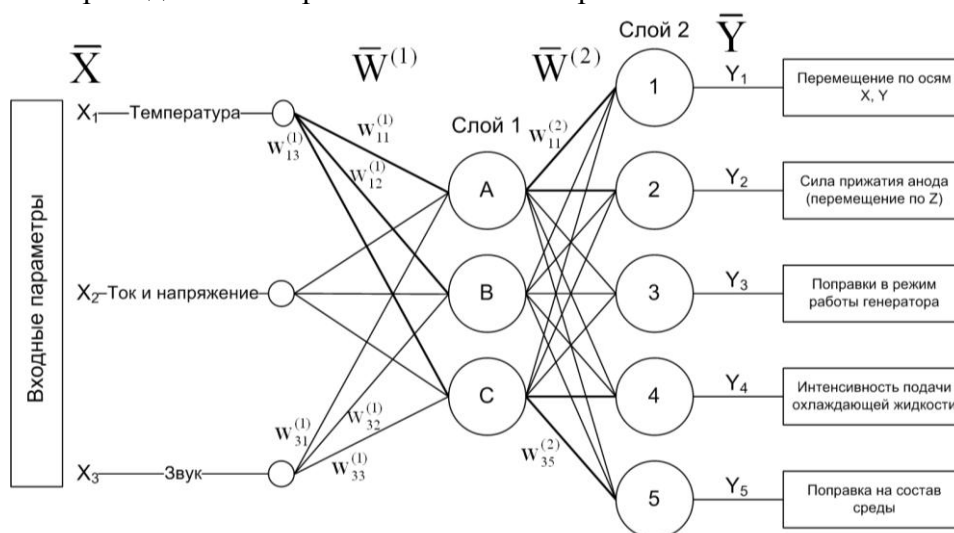


Рисунок 4 – Двухслойный перцептрон сети для программного обеспечения адаптивной системы управления ЭИЛ

Обучение НС может вестись с учителем или без него [16, 18]. В первом случае сети предъявляются значения как входных, так и желательных выходных сигналов, и она по некоторому внутреннему алгоритму подстраивает веса своих синаптических связей. Во втором случае выходы НС формируются самостоятельно, а веса изменяются по алгоритму, учитывающему только входные и производные от них сигналы. Существует великое множество различных алгоритмов обучения, описание которых не укладывается в рамки данной статьи.

На рис. 4, отражен вариант реализации нейронной сети для программного обеспечения адаптивной системы управления ЭИЛ.

На 3 входа сети (X_1 , X_2 , X_3) поступают сигналы, отражающие показания систем слежения за период времени t . Период времени может быть изменен, чем он короче, тем выше чувствительность системы, но ниже ее точность. Сигналы проходят по синапсам на 3 нейрона, образующие первый слой этой НС: А – Сплошность и толщина покрытия; В – Структура покрытия; С – Шероховатость. Другими словами, первый слой отражает функциональную зависимость входных сигналов от качественных параметров получаемого покрытия. После анализа входных параметров по трем критериям АВС, формируются сигналы отражающие несоответствие полученных сигналов требуемым, которые передаются

далее, на пять нейронов второго слоя. В результате обработки, на выходе мы имеем сформированные поправочные сигналы исполнительным органам устройства.

Совмещение адаптивной системы управления и принципов нейросетевого моделирования позволяет добиться стабильности протекания процесса ЭИЛ во времени, что является обязательным условием внедрения и широкого распространения технологии в производстве.

ВЫВОДЫ

- В результате экспериментальных и теоретических исследований были определены ключевые факторы, влияющие на протекание процесса ЭИЛ.
- Исследованы звуковые и световые сигналы сопровождающие процесс ЭИЛ, в результате установлено, что звук взрыва контактного мостика однозначно определяет тип импульса: рабочий, нерабочий и холостого хода, в отличие от светового сигнала.
- Были выявлены факторы и основные закономерности, определяющие протекание процесса ЭИЛ, получена физическая модель процесса, учитывающая различные стадии протекания процесса.
- Предложено устройство адаптивного управления ЭИЛ, на основе искусственного интеллекта, обеспечивающее стабильность протекания процесса за счет стабилизации температуры, состава газовой среды, позиционирование и электрических параметров системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур М. Наука 1982. 438 с.
2. Современное состояние и пути развития оптической пирометрии пламени успехи физических наук Т. LXXVI, вып. 4. Апрель 1962 г. 683 с. – 610 с.
3. Самсонов Г. В., Верхотуров А. Д., Бовкун Г. А., Сычев В. С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев: Наукова думка, 1976 г., 220 С.
4. Лазаренко Н. И. Современный уровень и перспективы развития электроискрового легирования металлических поверхностей. – «Электронная обработка материалов», 1967, №5, с. 46–58.
5. Стоянов В. И. Ремонт деталей электроискровым способом. – В кн.: Ремонт автомобильных деталей. 1954, М., Машгиз, с. 51-59.
6. Верхотуров А.Д., Ковальченко М.С., Лемешко А.М. Действие высококонцентрированных потоков энергии на тугоплавкие металлы и соединения // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. - 1979. - №4. - С.574-578.
7. Кортаев Д. Н. Влияние газовых сред на технологические возможности электроискрового легирования. Кандидатская диссертация. – Благовещенск: АГУ, 1998, – 203 с.
8. Теслина М.А. Исследование закономерностей формирования вторичных структур при электроискровой обработке медных железоуглеродистых сплавов и разработка на их основе покрытий функционального назначения. Кандидатская диссертация. – Хабаровск: ХНЦ ДВО РАН, 2008.
9. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 184 с.
10. Ионов П. А. Выбор оптимальных режимов восстановления изношенных деталей электроискровой наплавкой. Кандидатская диссертация. – Саранск: МГУ им. Н. П. Огарева, 1999. – 216 с.
11. Величко С. А. Восстановление и упрочнение электроискровой наплавкой изношенных отверстий чугунных корпусов гидрораспределителей. Кандидатская диссертация. – Саранск: МГУ им. Н. П. Огарева, 2000. – 239 с.
12. Бойцов А. Г. и др. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. – М.: Машиностроение, 1991. – 144 с.
13. Давыдов В. М., Ледков Е. А., Никитенко А. В. Изменение температуры анодов в процессе электроискровой обработки. Новые технологии и материалы. Инновации и инвестиции в промышленности Дальнего Востока : в 3 ч. Ч. 1 : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Комсомольск-на-Амуре, 15-19 окт. 2007 г.) / редкол. :А.М. Шпилев (отв. ред.) и др. - Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 174 с.
14. Козырь А. В., Глабец Т. В., Верхотуров А. Д. Жаростойкость и коррозионная стойкость сталей после электроискрового легирования. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2006.

15. Бурумкулов Ф. Х., Лезин П. П., Сенин П. В., Иванов В. И., Величко С. А., Ионов П. А. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика). МГУ им. Н. П. Огарева и др. – Саранск: Тип. «Крас. Окт.», 2003. – 504 с.

16. Давыдов В. М., Бойко Е. С. Основы построения нейронных сетей. учеб. пособие. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2005. – 67 с.

17. Верхотуров А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.

18. Горбань А. Н., Россиев Д. А. Нейронные сети на персональном компьютере. – Новосибирск : Наука, 1998. – 296 с.

Ледков Евгений Александрович

Место работы: ГОУ ВПО ТОГУ ведущий-инженер, аспирант

Индекс 680054 Адрес г. Хабаровск Трехгорная 62-76

Телефон 8-909-853-56-67

E-mail ger2001a@mail.ru

Я намереваюсь опубликовать тезисы доклада

Давыдов Владимир Михайлович

Место работы: ГОУ ВПО ТОГУ зав. каф. ТИИС д.т.н. профессор

Тел. (4212) 37-52-57

Индекс 680035 Адрес г. Хабаровск Тихоокеанская 136

E-mail: ger2001a@mail.ru

Химухин Сергей Николаевич

Место работы: Институт материаловедения ДВО РАН старший научный сотрудник к.т.н.

Тел. (4212) 37-52-57

Индекс 680035 Адрес г. Хабаровск Тихоокеанская 136

E-mail: ger2001a@mail.ru

Гиль Андрей Владимирович

Место работы: ДВГУПС инженер, аспирант

Тел. (4212) 37-52-57

Индекс 680035 Адрес г. Хабаровск Тихоокеанская 136

E-mail: ger2001a@mail.ru

УДК 621.22

Д.Н. ЕШУТКИН, А.И. АБДУРАШИТОВ, А.В. ЖУРАВЛЕВА

ДИНАМИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ КОРПУСА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РУЧНЫХ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Представлена динамическая модель движения корпуса и рукоятки в предельном режиме. На основе динамической модели разработана математическая модель позволяющая оценить предельный режим движения корпуса.

Ключевые слова: гидравлические ручные машины ударного действия, движение, отбойный молоток, вибрация, эталонный ударный механизм, предельный режим, фазы движения, математическая модель, динамическая модель.

There is dynamic model of the case's movement and the handle in the limiting mode submitted. On the basis of dynamic model allowing is developed the mathematical model to estimate a limiting mode of the case's movement.

Key words: hydraulic manual machines of shock action, movement, a jackhammer, the vibration, the reference shock mechanism, a limiting mode, phases of movement, mathematical model, dynamic model.

К числу основных требований, предъявляемых к гидравлическим ручным машинам ударного действия относятся высокие ударная мощность, коэффициент полезного действия и виброзащита оператора. Наибольшее влияние на показатели вибрации оказывают режимы движения корпуса.

В настоящей работе рассмотрено движение корпуса гидравлических отбойных молотков типа МО – 9Г [1]. На схеме (рисунок 1), показаны только основные тела, участвующие в движении при работе машины: корпус 1, боек 2, плунжер 3, инструмент 4, рукоятка 5 с пружиной 6.

Корпус, боек и плунжер образуют три гидравлических камеры переменного объема: камеру рабочего хода А, обратного хода Б и вспомогательную С.

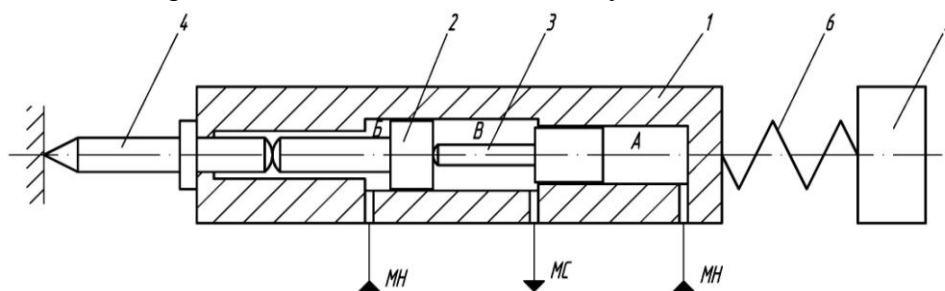


Рисунок 1 – Схема гидравлического отбойного молотка типа МО-9Г: корпус 1, боек 2, плунжер 3, инструмент 4, рукоятка 5 с пружиной 6; А – камера рабочего хода, Б – камера обратного хода, В – вспомогательная камера

Для удобства в дальнейшем оценки различных режимов движения корпуса отбойных молотков, нами рассмотрен режим, который назван предельным. При этом предполагается, что ударный механизм является эталонным [2], передача энергии от бойка к инструменту происходит мгновенно и постоянно, ударов корпуса о буртик инструмента не происходит.

На рисунке 2 представлена динамическая модель движения корпуса и рукоятки в предельном режиме.

Цикл движения бойка (рисунок 3а) состоит из трех фаз: разгон (t_1, l_1), торможение (t_2, l_2) и рабочий ход (t_3, l_3).

При этом цикл движения корпуса с рукояткой состоит из 5 фаз (рисунок 3б):

- I. Разгон корпуса и рукоятки под действием силы $P_B > Q$;
- II. Продолжение разгона корпуса и рукоятки под действием силы $P_B > Q$;
- III. Торможение корпуса до остановки и движение рукоятки по инерции;
- IV. Движение корпуса к инструменту и торможение рукоятки;
- V. Движение корпуса и рукоятки к инструменту.

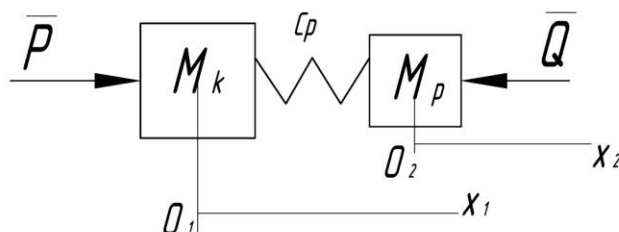


Рисунок 2 – Динамическая модель корпуса и рукоятки

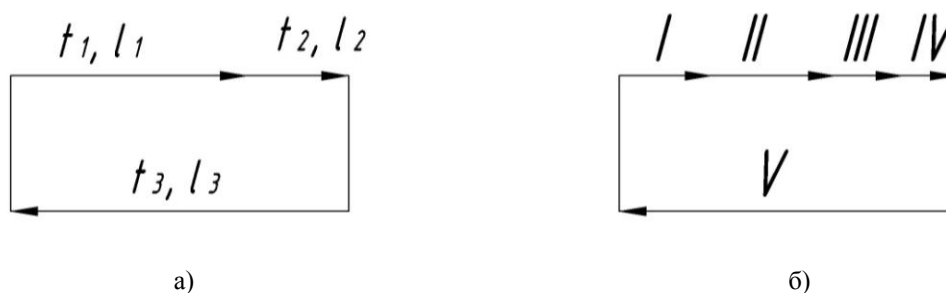


Рисунок 3 – Циклограмма движения а – бойка и б – корпуса с рукояткой

Корпус и рукоятка проходят первую фазу за время второй фазы движения бойка $t_2=t_1$. Корпус и рукоятка проходят вторую фазу за время третьей фазы движения бойка $t_3=t_{II}$. Движение корпуса и рукоятки на этих фазах будут определяться системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M_k \frac{d^2 x_1}{dt^2} = P_B + c_p(x_2 - x_1) \\ M_p \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -Q - c_p(x_2 - x_1) \end{cases}, \quad (1)$$

где M_k – масса корпуса; M_p – масса рукоятки; x_1 – координата перемещения корпуса; x_2 – координата перемещения рукоятки.

Остальные фазы движения корпус и рукоятка проходят за время первой фазы движения бойка $t_1=t_{III}+t_{IV}+t_V$.

Движение корпуса и рукоятки на третьей фазе будут определяться системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M_k \frac{d^2 x_1}{dt^2} = P_B - P_A + c_p(x_2 - x_1) \\ M_p \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -Q - c_p(x_2 - x_1) \end{cases}.$$

Движение корпуса и рукоятки на четвертой фазе будут определяться системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M_k \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -P_B + P_A + c_p(x_2 - x_1) \\ M_p \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -Q - c_p(x_2 - x_1) \end{cases}$$

Движение корпуса и рукоятки на пятой фазе будут определяться системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M_k \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -P_B + P_A + c_p(x_2 - x_1) \\ M_p \frac{d^2 x_2}{dt^2} = Q - c_p(x_2 - x_1) \end{cases}$$

Рассмотрим подробно систему уравнений описывающие первую и вторую фазы движения корпуса и рукоятки. Выразим перемещение рукоятки x_2 из первого уравнения системы (1):

$$x_2 = \frac{M_k}{c_p} \left(\frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{c_p}{M_k} x_1 - \frac{P_B}{M_k} \right). \quad (2)$$

Продифференцируем уравнение (2) по времени дважды:

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = \frac{M_k}{c_p} \left(\frac{d^4 x_1}{dt^4} + \frac{c_p}{M_k} \frac{d^2 x_1}{dt^2} \right) \quad (3)$$

Подставим (2) и (3) во второе уравнение системы (1), перенесем все слагаемые, содержащие x_1 и его производные в левую часть, остальные слагаемые перенесем в правую. Разделив на M_k/c_p , получим:

$$\frac{d^4 x_1}{dt^4} + \frac{c_p}{M_k} \left(1 + \frac{M_k}{M_p} \right) \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \frac{c_p}{M_k M_p} (P_B - Q).$$

Проделав ту же последовательность операций получим уравнение, описывающее движение рукоятки:

$$\frac{d^4 x_2}{dt^4} + \frac{c_p}{M_p} \left(1 + \frac{M_p}{M_k} \right) \frac{d^2 x_2}{dt^2} = \frac{c_p}{M_k M_p} (P_B - Q).$$

Те же операции проводятся и с остальными системами уравнений. В результате, уравнения движения корпуса и рукоятки описываются дифференциальными уравнениями четвертого порядка.

I и II фазы движения:

$$\begin{cases} \frac{d^4 x}{dt^4} + \frac{c_p}{M_k} \left(1 + \frac{M_k}{M_p} \right) \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{c_p}{M_k M_p} (P_B - Q) \\ \frac{d^4 y}{dt^4} + \frac{c_p}{M_p} \left(1 + \frac{M_p}{M_k} \right) \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{c_p}{M_k M_p} (P_B - Q) \end{cases}$$

III фаза движения:

$$\begin{cases} \frac{d^4 x}{dt^4} + \frac{c_p}{M_k} \left(1 + \frac{M_k}{M_p}\right) \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{c_p}{M_k M_p} (P_B - P_A - Q) \\ \frac{d^4 y}{dt^4} + \frac{c_p}{M_p} \left(1 + \frac{M_p}{M_k}\right) \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{c_p}{M_k M_p} (P_B - P_A - Q) \end{cases}$$

IV фаза движения:

$$\begin{cases} \frac{d^4 x}{dt^4} + \frac{c_p}{M_k} \left(1 - \frac{M_k}{M_p}\right) \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{c_p}{M_k M_p} (P_B - P_A - Q) \\ \frac{d^4 y}{dt^4} - \frac{c_p}{M_p} \left(1 - \frac{M_p}{M_k}\right) \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{c_p}{M_k M_p} (P_B - P_A - Q) \end{cases}$$

V фаза движения:

$$\begin{cases} \frac{d^4 x}{dt^4} + \frac{c_p}{M_k} \left(1 + \frac{M_k}{M_p}\right) \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{c_p}{M_k M_p} (P_B - P_A - Q) \\ \frac{d^4 y}{dt^4} + \frac{c_p}{M_p} \left(1 + \frac{M_p}{M_k}\right) \frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{c_p}{M_k M_p} (P_B - P_A - Q) \end{cases}$$

Произвольные постоянные уравнений определяются из начальных и граничных условий в каждой фазе. В конце пятой фазы должны выполняться условия: корпус находится в исходном положении, т.е. прижат к буртику инструмента и его координата и скорость равны нулю. Предложенная математическая модель, позволяет произвести анализ колебаний корпуса отбойного молотка, вычислить амплитуду колебаний и виброускорений корпуса и рукоятки при различных жесткостях пружины. Расчеты позволяют выбрать оптимальную жесткость, при работе в предельном режиме, в зависимости от параметров отбойного молотка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ешуткин, Д.Н. Гидравлические отбойные и бурильные молотки [Текст]: учебное пособие для вузов / Горбунов В.Ф., Ешуткин Д.Н., Пивень Г.Г., Тен Г.С. – Новосибирск: Институт горного дела СО АН СССР, 1983. – 98с., ил.
2. Ешуткин, Д.Н. Прикладная теория гидравлических машин ударного действия [Текст] : монография / Котылев Ю.Е., Ешуткин Д.Н.. – М.: Машиностроение - 1, 2007. – 176с., ил.

Ешуткин Дмитрий Никитович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Доктор технических наук, зав. кафедры «Теоретическая и прикладная механика», профессор
 Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29
 Тел. (4862) 419846, E-mail. termeh@ostu.ru

Абдурашитов Артем Прикович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»
 Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29
 Тел. 89208202064, E-mail. abdurashitov_art@mail.ru

Журавлева Анжелика Викторовна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика»
 Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29
 Тел. (4862) 419872, E-mail. termeh@ostu.ru

КОНСТРУКТИВНЫЕ ПРИЗНАКИ И МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ НАКЛАДНЫМИ ШАГОВЫМИ СИСТЕМАМИ И РОБОТАМИ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В статье описаны основные конструктивные особенности накладных шаговых систем и роботов (НШСиР). Подробно рассмотрен лингвистический подход для реализации системы безоператорного интеллектуального управления НШСиР. Представлена структура типового конструктивного решения НШСиР. Дана классификация типов управления НШСиР. Представлена трехуровневая система управления адаптивного НШСиР с применением элементов решений на базе моделей искусственного интеллекта, с кратким описанием функций каждого уровня.

Ключевые слова: НШСиР, методы управления, лингвистический подход, накладные шаговые системы и роботы.

This paper describes basic construction features of superimposed stepping systems and robots (SSSR). In detail examined linguistic approach for SSSR unmanaged intellectual control system implementation. Presented typical SSSR constructional solution structure. Given classification for SSSR control types. Presented three layer control system for adaptive SSSR with solution elements application based on artificial intelligence models, and each level functions shortly described.

Key words: SSSR, control methods, lynguistic approach, superimposed stepping systems and robots.

Режимы применения накладных шаговых систем и роботов (НШСиР) характеризуются полной автономией перемещения, ориентации, закрепления и выставки его на поверхности, а также программными движениями технологического узла с адаптивным управлением. При этом на практике применения робототехники, оператор выполняет не только функции контроля за правильностью технологических операций на одном шаге взаимодействия, но и на всей поверхности, осуществляя интеллектуальный обмен информацией с НШСиР в интерактивном режиме. Причиной этого является невозможность запрограммирования всех сложных взаимодействий накладного устройства с поверхностью [1].

НШСиР отличаются многомерностью и многофункциональностью взаимодействий с поверхностью и окружающей средой. Унифицированная структурно-кинематическая схема трехопорного НШСиР с функциями перемещения приведена на рисунке 1.

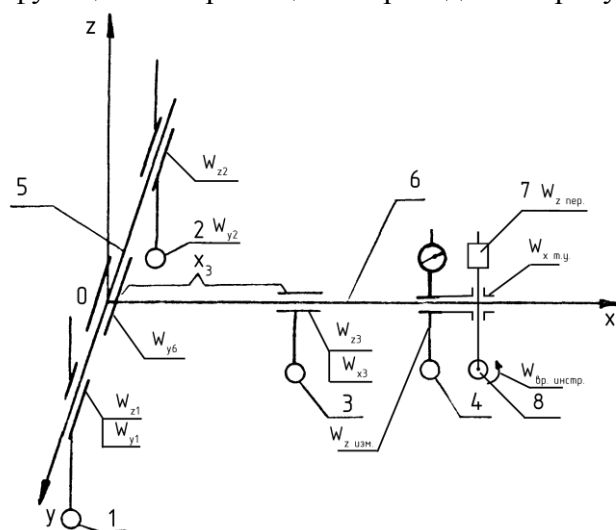


Рисунок 1 – Унифицированная структурно-кинематическая схема трехопорного НШСиР с функциями перемещения

1,2,3 – опорные узлы НШСиР; 4 – измерительный узел НШСиР; 5 – поперечная направляющая;

6 – продольная направляющая; 7 – технологический узел; 8 – инструмент.

$W_{z1,2,3}$ – функции перемещения опорных узлов по оси Z;

$W_{y1,2}$ – функции перемещения опорных узлов 1 и 2 по оси Y;

W_{y6} – функция перемещения продольной направляющей по оси Y;

W_{x3} – функция перемещения опорного узла 3 по оси X;

$W_{z \text{ пер.}}$ – функция перемещения инструмента по оси Z;

$W_{x \text{ т.у.}}$ – функция перемещения технологического узла по оси X;

$W_{\text{вр. инстр.}}$ – функция вращения инструмента.

Имеется значительный опыт программного управления как с, так и без ЭВМ, много специфических и общих решений управления с оператором и без него, только прямого воздействия и с обратными связями и т.д. [2]. Применение существующих схем автоматизированного управления совместно с оригинальными решениями специальных задач способствуют эффективному внедрению в производство накладной информационной техники. Структурные взаимодействия отдельных узлов НШСиР создают новые условия как в процессе их использования, так и в системной реализации управления. При этом необходимы решения отдельных вопросов состояния и проектируемого объекта, и его информационного взаимодействия с накладными устройствами, т.е. в иных случаях необходимо изменить конструктивный облик поверхности и технологический процесс ее изготовления.

Главные и вспомогательные функции НШСиР делятся на основные и дополнительные. Основные обеспечивают определенную последовательность рабочих органов устройства в любых режимах. Дополнительные заключаются в создании определенных дополнительных условий для реализации основных функций. Дополнительные условия - это есть нечто иное, как стартовое управляющее воздействие, определяющие те или иные движения рабочих органов. Для их реализации нужны специфические условия (положения переключателей режимов, рычагов управления, кнопок, определенное положение рабочих органов и т.д.). Они могут быть созданы операторами или рабочими органами устройства.

Задачи, поставленные перед НШСиР, и требования, предъявляемые к их конструктивным особенностям, математическому и программному обеспечению, определяют все большее приближение их к известным биологическим системам. Поэтому структура описания поведения и движения такого устройства должна быть идентичной структуре системы управления биологической системы. При этом в задаче построения движения можно подметить ряд особенностей, которые характерны и для биологической и для накладной информационной системы [3].

Прежде всего, необходимо отметить наличие у обеих систем большого числа степеней подвижности и свободы или многомерность и многопараметричность, которые необычайно сложно функционально взаимосвязаны. Поэтому управление движением должно осуществляться, как отмечалось в работах [2,3], по замкнутому принципу с адаптивными режимами.

Последние указывают на вторую общность с биологическими системами - наличие чувствительных (афферентных) систем, определяющих управление движениями по принципу "сенсорных" коррекций [2,4], который заключается в следующем: ЭВМ (мозг), программируя некоторое движение, через управляющую систему (афферентные нервные волокна) подает сигналы на приводы (мышцы), которые приводятся в действие. Одновременно с этим через адаптивные (афферентные) системы обратно в мозг (ЭВМ) поступают сигналы о текущем состоянии исполнительной системы. На основании полученной информации ЭВМ (мозг) вырабатывает новые управляющие воздействия. Следует отметить, что любое движение осуществляется при участии всех адаптивных связей и решение ЭВМ осуществляет при комплексном анализе адаптивных сигналов.

При такой структуре построения управления движением синтез адаптивных систем можно произвести по уровням, тем более что адаптивные коррекции ведутся обычно синтезированными комплексами, усложняющимися от низших уровней к высшим.

Следует также отметить и еще один важный элемент, обеспечивающий оптимизацию управления. Это принцип наименьшего взаимодействия между уровнями управления, предложенный в работе [2].

Выполнение указанных функций приведенной структуры управления и реализация их характеристик связано с переработкой большого количества информации. Поэтому перед теорией накладных информационных систем ставятся задачи математического описания:

- состояния управляемых элементов и объекта взаимодействия;
- передачи информации и процессов ее переработки;
- выдачи и снятия управляющих сигналов адаптации, определения их рассогласования с задающими;
- оценки приспособленных функций системы, т.е. идентификации объекта и системы.

Система безоператорного управления НШСиР - это типовой пример сложной системы, имеющей иерархическую структуру адаптивного управления. Наиболее общим подходом для реализации этой схемы является лингвистический подход. Он очень хорошо согласуется с иерархической уровневой структурой программного обеспечения и предусматривает последовательный языковой перевод с одного уровня на другой, который должен быть обеспечен достаточной близостью используемых языков. Таким образом, если система управления состоит из t уровней, то она должна иметь t словарей, t грамматик и $t - 1$ транслятор.

Рассмотрим t -й уровень иерархической системы управления. Пусть словарь этого уровня состоит из K_i символов – $A_1, A_2 \dots A_{K_i}$, Грамматика состоит из n_i правил – $F_1^i, F_2^i, \dots, F_{n_i}^i$. Тогда указанные правила позволяют объединить символы языка t -ого уровня в определенные слова

$$F_1^i : A_1 \text{ --- } A_1 A_3$$

$$F_2^i : A_4 A_1 A_2 \text{ --- } A_4 A_3 A_2$$

$$\dots \quad \dots \quad \dots$$

К низшему рангу относятся языки, описывающие движения в операционных кодах, языки иероглифического типа и т.п. Они предназначены для описания простых движений. Для сложных движений используют языки высоких уровней, которые дают возможность подавать программные команды в обобщенном виде.

Наиболее подходящим "входным языком" для НШСиР является единый "родной язык машины", построенный на фонетических свойствах, характеризующихся:

- широким использованием манипуляторно-ориентированных языков типа МАНТРАН.
- выражением отношений между слогами с помощью служебных частиц;
- эффективным использованием графических языков: кинетографии человеческих движений Р.Лабана, используемых в хореографии, мотографии А.П.Вальшева;
- построением комплексов обработки информации (КОИ) на базе нейросетевых структур, супервизорного управления, алгоритмов нечетных множеств.

Языки программирования, с помощью которых составляются различные подпрограммы поведения НШСиР, предполагают обращение к библиотеке стандартных подпрограмм, которые составляются на базе использования математических методов; интегральных, дифференциальных и алгебраических уравнений, теории конечных автоматов, исчисления предикатов алгоритмов нечетной логики и т.д.

Выбор языков программирования зависит от информационных потоков, предназначенных для переработки в ЭВМ, вида необходимого математического аппарата для расчетов и обеспечения скорости переработки информации.

При этом аналитическое конструирование его управления начинается с операций ориентирования НШСиР относительно поверхности или базовой системы координат. Поэтому при программировании его движений сначала используются подготовительные программы, описывающие объект, а затем в зависимости от наличия информации о реальном объекте возможны два пути структурного построения программы.

1. При неизвестной форме и положении объекта функции программируются в последовательности: управление движением исполнительного органа - считывание, преобразование, и обработка измерительной информации - коррекция движения

2. При известной форме и расположении поверхности реального объекта программируется управление движением исполнительного органа, а система обратной связи через ЭВМ и блок управления корректирует это движение.

При этом, кроме вышеуказанных методов, могут быть применены в отдельных случаях методы избыточных переменных, которыми движение устройства, как избыточной системы, может быть описано конечными уравнениями или уравнениями Пфаффа. В них обычно число уравнений равно или больше числа уравнений связи.

В практике математического описания программ довольно широко используется экспериментальный метод организации управления НШСиР, в основу которого кладется единый принцип минимизации некоторых функциональных состояний, представляющих рассогласование между командой, переданной высшим уровнем и величиной, характеризующей текущее состояние устройства и среды. Такой функционал называется вектором ситуаций [5].

При этом необходимы два уровня управления: низший и тактический уровень. Низший уровень выполняет команды высшего по рангу уровня, которые сводятся к заданию значения каждой из координат степеней подвижности рабочего органа или закона изменения во времени каждой из координат на заданном временном интервале.

Тактический уровень формирует команды вектора ситуаций для низшего уровня управления, осуществляя при этом выполнение некоторых обобщенных команд, задаваемых более высоким уровнем или формируемых человеком-оператором на языке типа ЯДРО. Тактический уровень охватывает все команды по заданию определенного пространственного положения или множества их положений исполнительного органа НШСиР без требования изменения окружающей среды. Здесь также учитываются дополнительные условия, при которых должно достигаться заданное пространственное положение

Применяется также ряд способов синтеза алгоритмов принятия решений для частных задач, связанных как с моделированием внешнего поведения, вырабатывающих самостоятельно целесообразное поведение, так и задач, способ решения которых не указывается. Оптимальный способ и решение выбирает и выполняет ЭВМ.

К таким способам необходимо отнести метод пространства состояний, метод исчисления предикатов, основанный на автоматическом доказательстве теорем при восприятии абстрактной внешней среды, модель которой устройство создает с помощью сенсорных систем: использование системы вопрос-ответ. В них системы получают информацию об объектах, принадлежащих к некоторому классу, и отвечают на поставленные вопросы, используя эту информацию.

Автоматические НШСиР могут быть программные или управляемые от ЭВМ, биотехнические - командные, копирующие и интерактивные, использующие автоматизированные, супервизионные и диалоговые режимы. В устройствах комбинированного управления ЭВМ освобождает оператора от выполнения однообразных движений, одновременно обеспечивая надежность и точность операций. Причем, участие человека позволяет решать практически любые задачи взаимодействия без перестройки управляющих алгоритмов в условиях неопределенной изменяющейся среды.

Типовое конструктивное решение НШСиР (рис. 1) содержит исполнительные органы и приводы, представляющие собой многозвенные, многошарнирные механизмы, на конце кинематической цепи которых укрепляется приспособление, взаимодействующее с окружающей средой (схват для захвата объекта манипулирования, технологический узел проведения операционных действий, измерительная головка для получения информации о геометрии заготовки, опорная система и т.д.).

Управление передвижениями и органами НШСиР может осуществляться программным устройством, человеком-оператором, ЭВМ или с помощью любого их сочетания. Датчики информации вместе с преобразователями и, в ряде случаев, с ЭВМ, составляют сенсоры НШСиР которые "о чувствляют" устройство, обеспечивая управляющие элементы и оператора необходимой информацией о состоянии объектов, окружающей среды, органов, средств передвижения, аппарата - носителя и других подсистем, а также информацией о функционировании НШСиР целом.

Органами управления могут служить различные рукоятки, бустеры, кнопки, тумблеры, наборные поля, или же задающий орган, в той или иной степени идентичный исполнительному (копирующий режимы управления).

Зависимость $W_z(t)$ от $W_x(t)$ можно называть передаточной функцией системы управления $W(s)$. Она представляет собой ее математическое описание. В общем виде передаточная функция для линейной стационарной системы имеет вид:

$$W(s) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} W_z(t)e^{-st} dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t)e^{-st} dt}$$

где числитель и знаменатель - преобразования Лапласа для выходного и входного сигналов соответственно.

Контуры управления и о чувствления позволяют представить возможные комбинации разных принципов управления, которые можно классифицировать по таблице 1.

Таблица 1 – Классификационные признаки типов управления НШСиР.

Тип	Разновидности
Автоматические	1. Программные (1-ое поколение)
	2. Адаптивные (2-ое поколение - НШСиР с о чувствлением).
	3. Интеллектуальные (3-е поколение - интегральные НШСиР, НШСиР с искусственным интеллектом)
Биотехнические	1. Командные – управление отдельными степенями подвижности
	2. Кодированные – одностороннего и двухстороннего действия
	3. Полуавтоматические – управляющая рукоятка с вычислителем
Интерактивные	1. Автоматизированные – чередование автоматических и биотехнических режимов
	2. Супервизорные – автоматические с углоуказательными командами
	3. Диалоговые – высшие формы взаимодействия с человеком

Программные НШСиР с точки зрения возможности управления могут быть разделены на три вида:

1. НШСиР с обучением;
2. интеллектуальные;
3. управляемые НШСиР.

Обобщенная структурно-функциональная схема системы программного управления НШСиР приведена на рисунке 2.

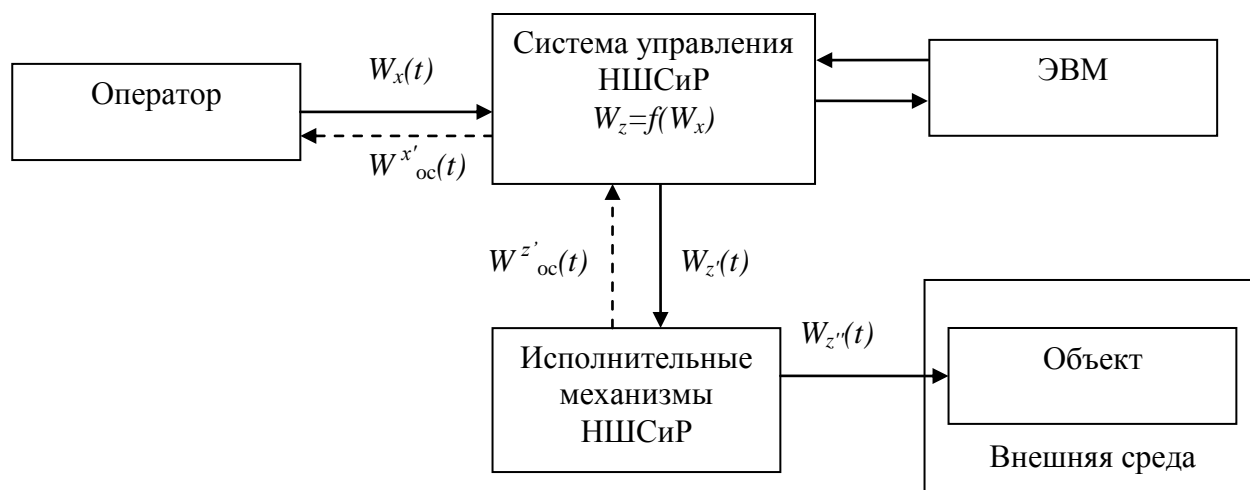


Рисунок 2 – Обобщенная структурно-функциональная схема системы программного управления НШСиР

*$W_x(t)$ – задача управления; $W_z(t)$ – функция управления;
 $W_z(t)$ – управляющее воздействие в виде физической величины;
 $W_z''(t)$ – целенаправленное воздействие робота на объект; $W^{z'}_{oc}(t)$ – функция обратной связи*

НШСиР с обучением представляют собой машины широкого назначения с механизацией и автоматизацией ручных операций, снабженные устройствами памяти. Управление таким устройством, выполняющим повторяющиеся операции, включает в себя: обучение, запоминание, воспроизведение и отработку программы, а системы памяти и управления могут классифицироваться по видам используемых сигналов: аналоговые, цифровые и аналого-цифровые.

Интеллектуальные НШСиР - это роботы, которые могут распознавать объекты и их состояние и на основе его автоматически определять действия, которые им следует выполнить. Тогда операция выполняется в следующей последовательности:

- составляется план операций;
- с учетом распознавания состояния объекта и условий работы определяется порядок действий;
- приводятся в действие механизмы робота.

Характерная особенность данной системы управления состоит в наличии функций распознавания объекта и его состояния с помощью сенсорных устройств и в определении (на основе этой информации и полученных от оператора команд) действий, подлежащих выполнению.

Методы управления исполнительными механизмами аналогичны методам, используемым в НШСиР с обучением. Для того, чтобы интеллектуальное устройство могло адаптироваться к окружающей обстановке, его необходимо снабдить разнообразными сенсорными системами, например: зрения, слуха и осязания.

В интеллектуальных НШСиР составляется план операции, и они выполняют работу на основе подаваемых человеком команд и результатов распознавания. Команды могут иметь самую различную форму: от простой и конкретной, до достаточно абстрактной. Необходим также обмен информацией между человеком и накладным устройством. Последние две задачи могут решаться с помощью супервизорного управления.

В качестве примера системы управления интерактивного НШСиР можно рассмотреть структурно-функциональную схему супервизорного управления НШСиР, которая характеризуется тремя контурами (рисунок 3).

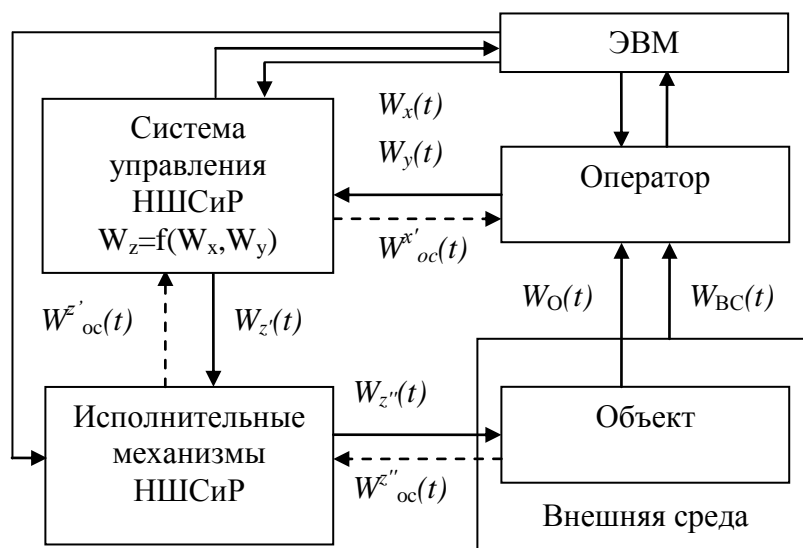


Рисунок 3 – Структурно-функциональная схема супервизионного управления НШСиР

$W_x(t)$ – задача управления

$W_z(t)$ – функция управления

$W_z'(t)$ – управляющее воздействие в виде физической величины

$W_z''(t)$ – целенаправленное воздействие робота на объект

$W_y(t)$ – информация о состоянии внешней среды и объекта

$W_0(t)$ – воздействие объекта или процесса на оператора

$W_{BC}(t)$ – воздействие внешней среды на оператора

1. Дистанционно удаленный контур, замкнутый через ЭВМ и представляющий собой автономную исполнительную подсистему управления для решения несложных задач.

2. Супервизорный контур, замыкающийся через оператора на систему управления, предназначенный для выработки стратегии управления на исполнительный контур, изменения характеристик исполнительного контура и, при надобности, для непосредственного управления движением исполнительного органа.

3. Местный командный контур, независимый от исполнительного, разрабатываемый для представления оператору возможности моделировать на командной ЭВМ исполнительную часть НШСиР с целью предсказания его поведения.

Командная ЭВМ служит для представления информации оператору и поэтому при проектировании супервизорной системы управления стоят две взаимосвязанные проблемы: создание средств связи оператора и ЭВМ и конструирование исполнительной части таким образом, чтобы она могла самостоятельно решать некоторые мелкие задачи, на которые оператор разделит задачи управления.

Для того, чтобы исполнительная часть НШСиР имела некоторую независимость в действиях, в дополнение к исполнительному органу и системе приводов, она должна иметь средства для получения информации и самостоятельного принятия решения. Для выработки ряда последовательных действий и выбора из них одного, необходимого для решения поставленной задачи, автономная подсистема должна иметь "представление" об окружающей среде и состоянии исполнительной части устройства. Поскольку окружающая среда может меняться в процессе работы, обратные связи должны иметь внутреннее "представление" системы об окружающей среде.

Уровень эффекторного управления интегральных НШСиР осуществляет непосредственное воздействие на исполнительные органы устройства. Оно относится к низшему уровню и обеспечивает полностью автономное выполнение разнообразных команд, задающих в конечном счете одно или множество пространственных положений, которые должен приобрести в конце операции рабочий инструмент, закрепленный на конце исполнительного органа (схват, датчик, сверло и т.д.). Переход в эти положения

осуществляется с учетом тех особенностей внешней среды, которые важно знать для успешного выполнения команд этого уровня, соответствующих элементарным операциям по переносу инструмента и его операционных действий.

Подход к синтезу эффекторного управляющего уровня целесообразно вести с позиций теории автоматического управления, что требует:

– формализации вышеупомянутых команд - целей управления с помощью скалярных равенств

$$\sum = F_{зад} - W(q) = 0, \quad (1)$$

где \sum - функционал рассогласования между векторами;

$F_{зад}$ - заданное и W - текущее положение инструмента;

последний $W = W(q)$ является функцией обобщенных координат НШСиР, определяющих относительные (угловые или линейные) перемещения сложных звеньев;

– формализация ограничений, определяющих модификацию основных команд, для чего используются конечные равенства

$$K(q) = 0, \quad (2)$$

соответствующие описанию способа переноса инструмента, например, по прямой:

– формализации ограничений, обусловленных особенностями внешней среды с помощью неравенств

$$\psi(q) \leq 0, \quad (3)$$

выражающих требования несоприкосновения звеньев НШСиР с препятствиями.

Необходимы также дополнительные и обязательные конструктивные ограничения на предельные значения обобщенных координат

$$q_{min} < q_i < q_{max} \quad (4)$$

Тогда задача синтеза закона управления при реализации команд эффекторного уровня формализуется так: требуется найти закон управления U приводами в функции фазовых координат q_1, q_2, \dots, q_k , т.е. в виде "замыкания" для динамической системы, заданной уравнениями динамики механической части НШСиР с приводами. Этот закон должен обеспечивать перевод вектора q , связанного уравнениями и ограничениями (1), (2), (3), из некоторого начального состояния в заданное конечное состояние, определяемое целевыми условиями (4).

Решение этой задачи сводится к известной задаче модификации дифференциальных уравнений механической части накладного устройства и приводов по заданным частным интегралам, которые являются ограничения (2), (3) типа неравенств (4), (5), сведенных известными приемами к равенствам.

За последние три десятилетия, большой объем исследований проводится по созданию НШСиР, у которых средства передвижения выполнены шаговыми. Система управления адаптивного шагового НШСиР состоит из следующих блоков:

– вычислительного устройства, вырабатывающего сигналы управления приводами шарниров ног;

– блока сбора информации о состоянии шагового устройства и окружающей среды;

– приводов степеней подвижности;

Вычислительное устройство, на основе которого может быть реализована система управления, выполняет следующие функции:

– формирует стереотипы походки с их коррекцией в зависимости от рельефа поверхности;

– обеспечивает устойчивое равновесие машины;

– стабилизирует горизонтальное положение платформы независимо от рельефа (если нет каких-либо других требований);

– поддерживает заданную высоту платформы над горизонтом (если нет иных требований);

– расшифровывает команды человека-оператора.

Блок сбора информации состоит из:

– датчиков положения звеньев ног;

– тактильных датчиков, сигнализирующих о соприкосновении стопы с опорой;

– датчиков усилий в опорах ног;

– датчиков горизонта, измеряющих угловые отклонения координат, связанных с платформой, от координат, связанных с горизонтом;

– устройств, измеряющих высоту НШСиР над поверхностью;

– устройств, измеряющих высоту стоп над поверхностью.

Задача управления шагающим НШСиР может быть реализована трехуровневой системой управления (рисунок 4).

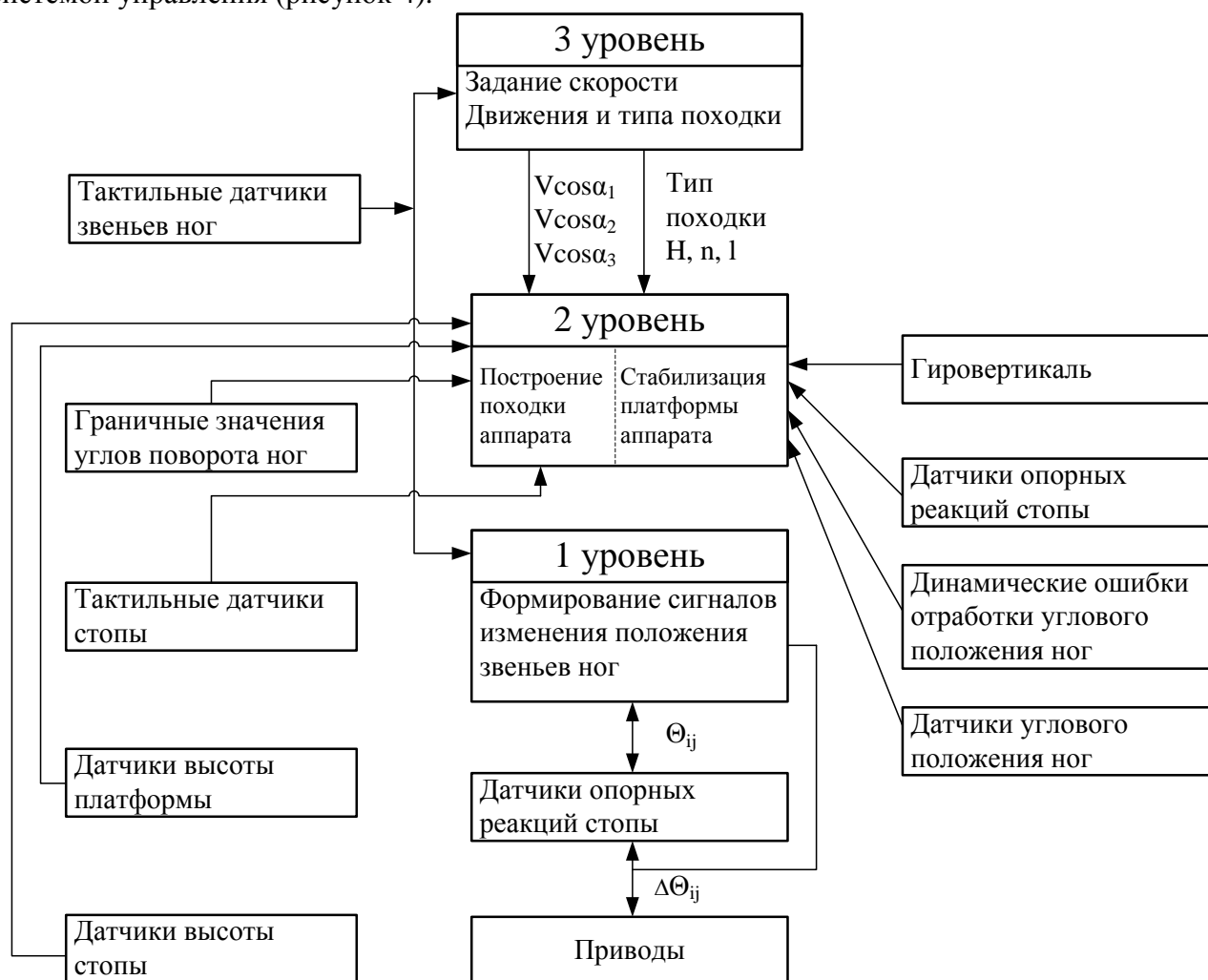


Рисунок 4 – Функциональная схема типовой трехуровневой системы управления НШСиР

Первый уровень вырабатывает сигналы управления для шарниров ног, обеспечивая перемещение устройства в заданном направлении с заданной скоростью. Языком этого уровня является язык дифференциальных уравнений. Он же обеспечивает решение дифференциальных уравнений, которые описывают движение каждой ноги. Входными данными этого уровня являются:

- начальное значение углов $\theta_1^i, \theta_2^i, \theta_3^i, i = 1, 2, \dots, 6$ между звеньями ног, измеряемые для каждой из них, с помощью датчиков положения звеньев;
- направляющие косинусы, задаваемые высшим уровнем и определяющие траекторию движения стопы;
- величина и знак скорости V , определяющей направление и темп движения стопы, Значение этих углов или их приращений являются сигналами для сервоприводов угловых координат ног.

Второй уровень управления определяется тремя блоками программ:

- формирования походки (он описывает последовательность и характер перемещения ног);
- поддержания равновесия, путем смещения центра тяжести машины таким образом, чтобы его проекция на плоскость опор оставалась внутри многоугольника ног;
- выдерживания высоты и горизонтального положения платформы.

Третий уровень управления задает движение НШСиР и тип его походки через определение значений направляющих косинусов и скорости для каждой ноги устройства, и обозначает моменты начала и конца их движения.

Используемые системы ориентации НШСиР отличаются от систем устройств с полуоператорными режимами только динамическими режимами применения и, в связи с этим, должны иметь адаптивные свойства, обеспечивающие непрерывность контроля и достаточную скорость переработки информации о расположении относительно технологической поверхности.

Все полуоператорные режимы по программам отдельных операций и переходов здесь также могут быть реализованы при остановке устройства и выполнении последовательностей, указанных выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников В.П. Теория накладных шаговых систем. -М.: РИО МАИ, 2009. -356 с., ил.
2. Ларин В.Б. Управление шагающими аппаратами. -Киев: Наукова думка, 1980, -168 с., ил.
3. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. -М.: Мир, 1976, -250 с., ил.
4. Градецкий В.Г., Вешников В.Б., Калиниченко С.В., Кравчук Л.Н. Управляемое движение роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. Институт проблем механики -М.: Наука, 2001, -359 с., ил.
5. Артоболевский И.И., Кобринский А.Е. Роботы. -М.: Машиностроение, 1970, №5 с 3-11.

Мельников Владимир Павлович

Московский авиационный институт (государственный технический университет), г. Москва
Доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ
Г. Реутов, Молодежная 1 239, тел. (495) 791-3972, (916) 535-7493

Басенин Михаил Александрович

Московский авиационный институт (государственный технический университет), г. Москва
Аспирант
127254, г. Москва, Гончарова 136 кв. 23, тел. (916) 567-6778
E-mail: basenin@eirc.ru, basenin@gmail.com

УДК 662.927

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, О.С. ПЕТРОВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОМЕЩЕНИИ

Представлены результаты экспериментальных исследований устройства контроля и регулирования температуры воздуха в помещении.

Ключевые слова: температура, устройство контроля и регулирования, помещение.

Results of experimental researches of the device of the control and regulation of temperature of air in a room are submitted.

Key words: temperature, the device of the control and regulation, the room.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ОрелГТУ разработано устройство, позволяющее в автоматическом режиме контролировать и регулировать температуру воздуха в помещении в зависимости от его назначения [1-4]. Проведенные ранее исследования показали, что разработанное устройство позволяет поддерживать заданную температуру воздуха в помещении в диапазоне от 18 до 25 °С с предельной погрешностью не более $\pm 1,5$ °С [5]. С целью проверки воспроизводимости полученных результатов при различных условиях регулирования и изменении температуры наружного воздуха в широких пределах, а также определения качества регулирования возникла необходимость в проведении дополнительных натурных экспериментальных исследований, изложению результатов которых и посвящена настоящая работа.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец разработанного устройства контроля и регулирования, выполненный согласно рекомендациям [1-4]. Устройство имеет шкалу настройки на 8 уставок, которые соответствуют восьми значениям температуры в диапазоне от 18 до 25 °С, поддерживаемой в помещении.

Место проведения исследований – МЛПУ “Городская стоматологическая поликлиника № 1 г. Орла”, оборудованное однотрубной системой отопления. В южном фасаде здания было выбрано помещение площадью 17,5 м² с одним окном (площадь остекления 1,2 м²) и одним отопительным прибором (6 секций). В соответствии со СНиП 41-01-2003 у отопительного прибора устанавливалось исследуемое устройство контроля и регулирования (рисунок 1).

Время проведения исследований – период отопительного сезона 2008-2009 года (результаты, рассматриваемые в настоящей работе, получены в период с 13.11.2008 г. по 24.03.2009 г.).

Контрольно-измерительное оборудование. Для проведения исследований использовался измерительный комплекс, включающий вычислитель количества теплоты ВКТ-7, термометры сопротивления Pt 500 и персональный компьютер [6]. Использовались два канала измерения температуры – температуры воздуха в исследуемом помещении (t_1) и температуры наружного воздуха (t_2). Значения температур t_1 , t_2 регистрировались одновременно с частотой 1 час⁻¹ и сохранялись в памяти ВКТ-7, при этом погрешность определения температуры не превышала 0,1 °С.

Алгоритм проведения исследований заключался в том, что на каждой из четырех уставок в пределах диапазона контроля и регулирования (уставки № 1, № 3, № 4 и № 8)

трижды в разное время отопительного сезона производился мониторинг двух значений температуры (t_1 , t_2) в течение 6 суток (по 144 показания). Значения уставок изменяли согласно графику исследований (таблица 1).

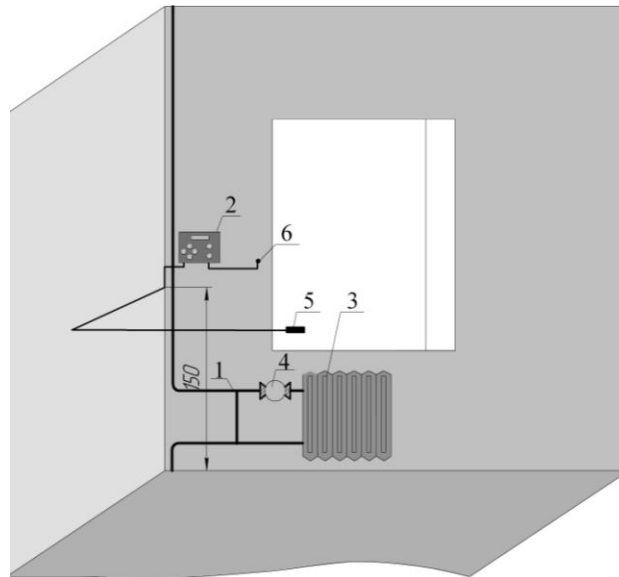


Рисунок 1 – Схема размещения экспериментального оборудования в помещении
 1 – трубопровод; 2 – вычислитель количества теплоты ВКТ-7;
 3 – отопительный прибор; 4 – исследуемое устройство контроля и регулирования;
 5 – датчик для измерения температуры воздуха в исследуемом помещении (t_1);
 6 – датчик для измерения температуры наружного воздуха (t_2)

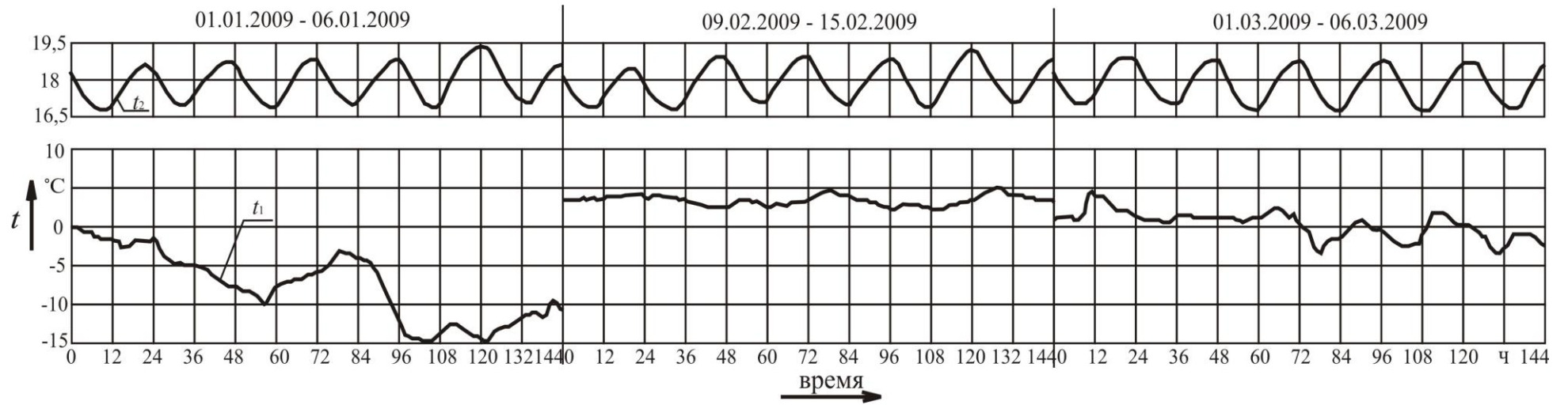
Таблица 1 – График проведения экспериментальных исследований

Дата	№ уставки	Номинальное значение температуры, соответствующей уставке, °С
01.01.2009-06.01.2009 09.02.2009-15.02.2009 01.03. 2009-06.03.2009	1	18
13.11.2008 – 18.11.2008 23.02.2009-28.02.2009 13.03.2009-18.03.2009	3	20
19.11.2008 – 24.11.2008 23.12.2008-28.12.2008 19.03.2009-24.03.2009	4	21
14.12.2008 – 19.12.2008 16.02.2009-22.02.2009 07.03.2009-12.03.2009	8	25

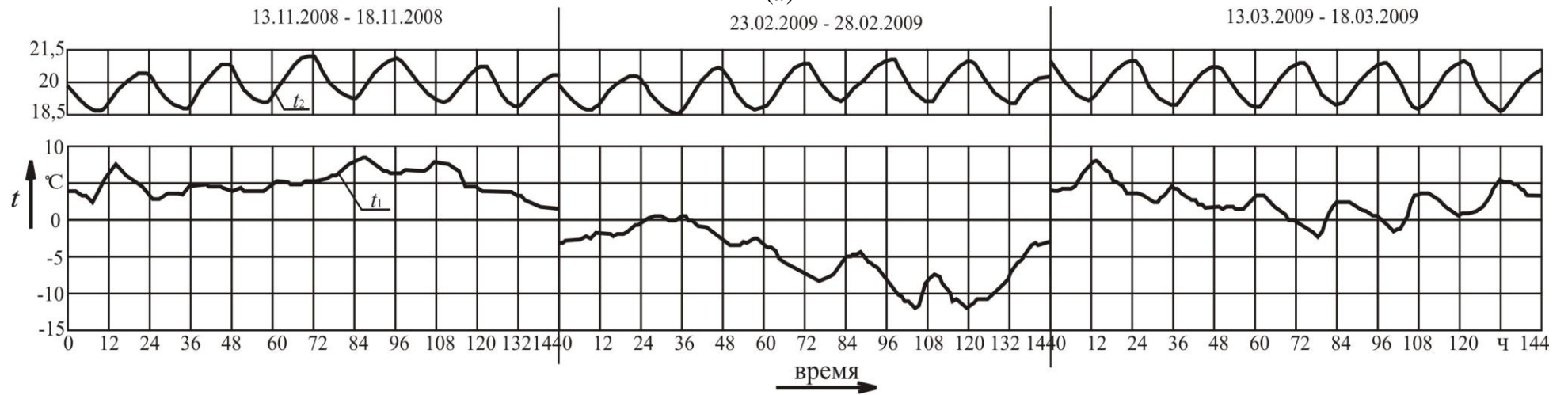
АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Диаграммы изменения температуры t_1 , t_2 от времени представлены на рисунке 2, а результаты статистического анализа экспериментальных данных – в таблице 2.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что независимо от временного периода (даты и месяца) при широком диапазоне изменения температуры наружного воздуха (от 5 до -15 °С на уставке № 1; от 8 до -12 °С на уставках № 3 и № 4; от 8 до -7 °С на уставке № 8) температура воздуха в помещении, оборудованном исследуемым устройством контроля и регулирования, устойчиво поддерживалась на установленном номинальном значении. При этом средние значения температуры отклонялись от номинальных не более, чем на 0,17 °С, а максимальное отклонение температуры от номинального значения на каждой из уставок в течение трех временных интервалов по 6 суток не превысило 1,38 °С.



(a)



(б)

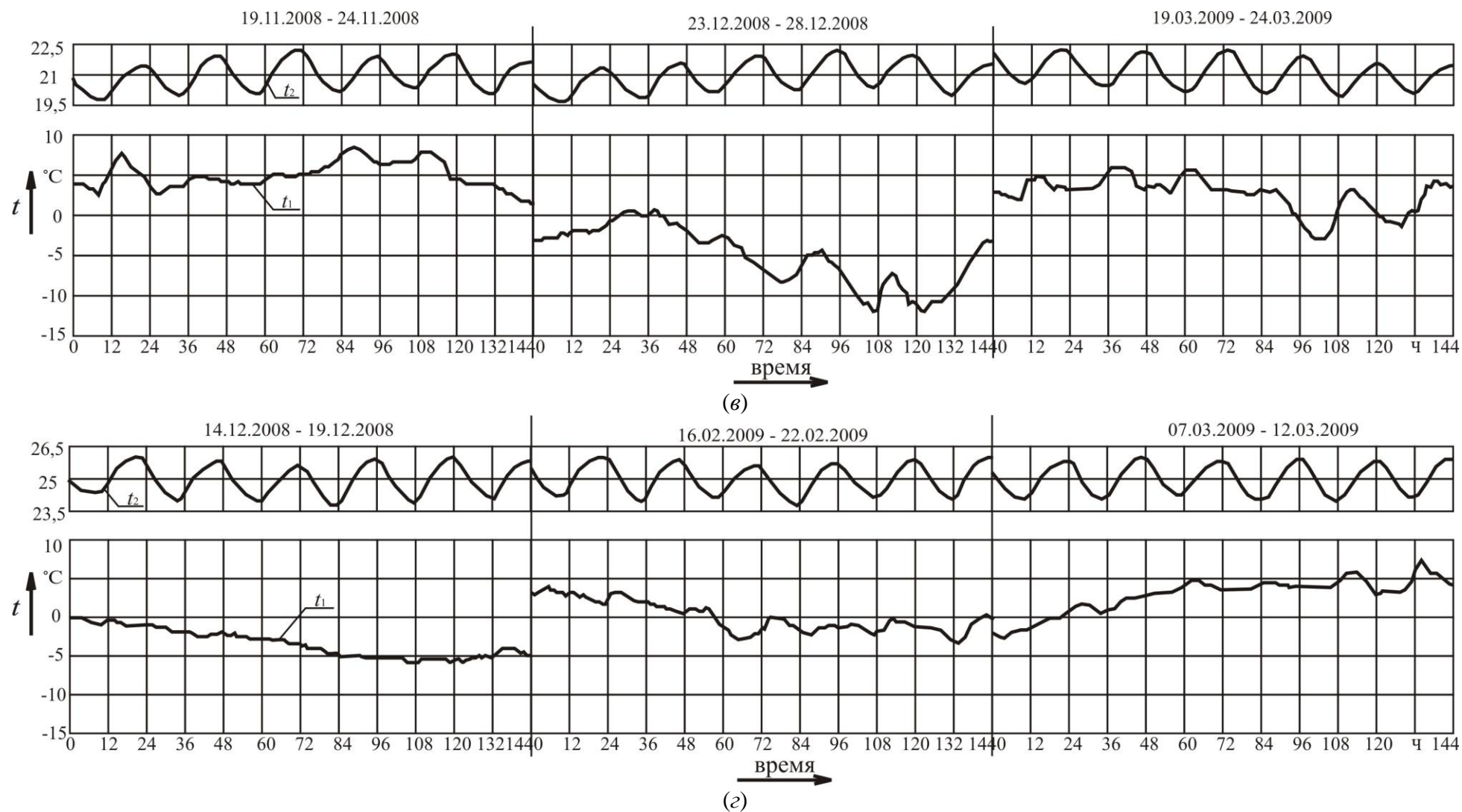


Рисунок 2 – Мониторинг температур воздуха в исследуемом помещении и наружного воздуха на исследуемых уставках: а) № 1; б) № 3; в) № 4; г) № 8

Таблица 2 – Анализ результатов исследований устройства контроля и регулирования на уставках № 1, № 3, № 4, № 8.

Дата	Температура наружного воздуха	Номинальное значение температуры, °С	Среднее значение, \bar{t}_1 , °С	Среднеквадратическое отклонение, S , °С	Максимальное отклонение от номинального значения, °С
1	2	3	4	5	6
Уставка № 1					
01.01.2009-06.01.2009	Снижалась от -0,13 °С до -9,8 °С, затем возрастала до -3,1 °С и снизилась до -10,6 °С	18	17,88	0,70	1,33
09.02.2009-15.02.2009	Повышалась от 3,2 °С до 4,0 °С, снижалась до 2,3 °С, затем возрастала до 4,4 °С, снижалась до 2,0 °С, повышалась до 4,9 °С и снижалась до 3,0 °С	18	17,87	0,69	1,2
01.03.2009-06.03.2009	Повышалась от 1,3 °С до 4,8 °С, а затем снижалась до -2,3 °С	18	17,94	0,70	1,12
Уставка № 3					
14.11.2008-18.11.2008	Снизилась от 4,03 °С до 2,78 °С, затем возрасла до 7,3 °С и снизилась до 1,37 °С	20	19,87	0,69	1,35
23.02.2009-28.02.2009	Повышалась от -3,16 °С до 0,63 °С, затем снижалась до -12,04 °С и возросла до -3,15 °С	20	19,83	0,68	1,38
13.03.2009-18.03.2009	Повышалась от 4,21 °С до 7,74 °С, снижалась до -2,07 °С и возрастала до 3,27 °С	20	19,93	0,68	1,18
Уставка № 4					
19.11.2008-24.11.2008	Снижалась от 4,03 °С до 2,78 °С, возрастала до 8,42 °С и снижалась до 1,37 °С	21	20,96	0,67	1,24
24.12.2008-28.12.2008	Повышалась от -3,16 °С до 0,57 °С, снижалась до -11,66 °С и повышалась до -3,15 °С	21	20,91	0,66	1,34
19.03.2009-13.03.2009	Повышалась от 3,01 °С до 6,00 °С, снижалась до -2,55 °С и повышалась до 4,35 °С	21	21,06	0,66	1,29
Уставка № 8					
14.12.2008-19.12.2008	Снижалась от -0,14 °С до -4,93 °С	25	24,95	0,64	1,16
16.02.2009-22.02.2009	Снижалась от 3,19 °С до -2,97 °С и возрастала до -0,12 °С	25	25,01	0,65	1,1
07.03.2009-12.03.2009	Повышалась от -2,2 °С до 7,11 °С и снижалась до 4,21 °С	25	25,01	0,65	1,05

Для количественной оценки качества процесса регулирования температуры воздуха в исследуемом помещении согласно рекомендациям [7] определялась также величина среднеквадратического отклонения температуры в процессе регулирования S :

$$S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta t_1^2 dt} \quad (1)$$

где T – время регистрации температуры; Δt_1 – отклонение температуры воздуха в исследуемом помещении от номинального значения.

Представленные в таблице 2 результаты вычислений S показывают, что наибольшее значение среднеквадратического отклонения температуры воздуха в исследуемом помещении S равно $0,7$ °С, при этом по мере увеличения номинального значения температуры значение S снижается от $0,7$ °С при номинальной температуре 18 °С до $0,65$ °С при номинальной температуре 25 °С (от $3,8$ % до $2,6$ %).

Анализ полученных экспериментальных данных (рисунок 2) указывает на наличие явно выраженной закономерной периодической составляющей в функции изменения температуры воздуха в помещении от времени. В этой связи применение для оценки воспроизводимости результатов регулирования температуры на одной и той же уставе в различных условиях широко применяемых для оценки воспроизводимости результатов измерений статистических методов не совсем корректно. Тем не менее, воспользуемся этими методами для оценочной количественной характеристики воспроизводимости результатов регулирования.

Выдвигается гипотеза о том, что независимо от изменения температуры наружного воздуха и времени принятия решения, устанавливая устройством контроля и регулирования заданное номинальное значение температуры, мы обеспечиваем данное значение температуры в помещении.

Для проверки выдвинутой гипотезы для каждой из уставок сравнивались средние значения температуры воздуха в помещении \bar{t}_1 для трех выборок и определялась статистическая значимость различия средних. Для этого определялись моменты распределения разности средних арифметических значений температуры для каждой j -ой пары серий значений температуры на исследуемой i -ой уставке:

$$G_{i(j)} = (\bar{t}_1)_{i(j)} - (\bar{t}_1)_{i(j+1)}, S_{G_{i(j)}} = \sqrt{\frac{S_{t_{i(j)}}^2}{n_{i(j)}} + \frac{S_{t_{i(j+1)}}^2}{n_{i(j+1)}}}, \quad (2)$$

$$S_{t_{i(j)}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_{i(j)}} (t_{ki(j)} - (\bar{t}_1)_{i(j)})^2}{n_{i(j)}}}, \quad (3)$$

где $i(j)$ – индексы, свидетельствующие о принадлежности величины к j -ой выборке на i -ой уставке устройства контроля и регулирования; $G_{i(j)}$ – j -ая разность средних арифметических значений температуры воздуха в помещении на i -ой уставке устройства контроля и регулирования; $S_{G_{i(j)}}$ – среднее квадратическое отклонение разности средних арифметических; $(\bar{t}_1)_{i(j)}$ – среднее арифметическое значение температуры воздуха в помещении; $S_{t_{i(j)}}$ – среднее квадратическое отклонение температуры воздуха в помещении; $n_{i(j)}$ – число отсчетов в выборке.

На основании расчетов по формулам (2) получено:

$$\begin{aligned} |G_{1(1)}| &= 0,01; |G_{1(2)}| = 0,07; |G_{3(1)}| = 0,04; |G_{3(2)}| = 0,1; |G_{4(1)}| = 0,05; |G_{4(2)}| = 0,15; |G_{8(1)}| = \\ &0,06; |G_{8(2)}| = 0; S_{G_{1(1)}} = 0,08; S_{G_{1(2)}} = 0,08; S_{G_{3(1)}} = 0,08; S_{G_{3(2)}} = 0,08; S_{G_{4(1)}} = 0,078; \\ &S_{G_{4(2)}} = 0,077; S_{G_{8(1)}} = 0,076; S_{G_{8(2)}} = 0,077. \end{aligned}$$

Задавшись доверительной вероятностью $0,95$, находились значения квантиля распределения вероятности $t_{0,95}$ и проверялось условие $|G| \leq t_{\alpha} \cdot S_G$ для каждой пары серий. Установлено, что для каждой уставки по всем парам выборок различие средних арифметических значений температур в сериях признано статистически не значимым, что

подтверждает высказанную выше гипотезу и подтверждает работоспособность и эффективность предлагаемого устройства.

Для оценки воспроизводимости (повторяемости) регулирования температуры на каждой из исследуемых уставок использовался критерий Кохрена [8]. Для каждой серии значений температуры на каждой из исследуемых уставок рассчитывался коэффициент $k_{крi}$:

$$k_{крi} = \frac{\max S_{t i(j)}}{\sum_{j=1}^3 S_{t i(j)}}, \quad (4)$$

где $\max S_{t i(j)}$ - максимальное среднеквадратическое отклонение из всех серий экспериментов для данной уставки.

На основании результатов расчетов установлено $k_{кр1} = 0,33$, $k_{кр3} = 0,34$, $k_{кр4} = 0,34$, $k_{кр8} = 0,34$. Для принятой доверительной вероятности 0,95, числа серий 3 и количества измерений в каждой серии 144 табличное значение коэффициента $k_{кр} = 0,403$. Так как $k_{кр} < k_{кр}$, то можно сделать вывод о хорошей воспроизводимости значений температуры при регулировании с использованием исследуемого устройства контроля и регулирования.

ВЫВОДЫ

Проведенные натурные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенного авторами оригинального устройства контроля и регулирования температуры для одноконтурных систем отопления. Они показали хорошую воспроизводимость результатов регулирования температуры воздуха в помещении при использовании данного устройства, при обеспечении высокого качества регулирования (погрешность не превышает 1,4 °С).

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2302031 РФ, МКИ G 05 D 23/02. Регулятор температуры / С.А. Чистович, С.П. Петров, А.И. Суздальцев, О.С. Петрова. – Оpubл. 27.06.2007, Бюл. № 18.
2. Патент № 75065 РФ на полезную модель МПК G 05 B 23/00 Датчик температуры / К.В. Подмастерьев, С.П. Петров, О.С. Петрова. – Оpubл. 20.07.2008, Бюл. № 20.
3. Патент № 79192 РФ на полезную модель МПК G 05 B 23/00 Датчик температуры / К.В. Подмастерьев, С.П. Петров, О.С. Петрова. – Оpubл. 20.12.2008, Бюл. № 35.
4. Подмастерьев, К.В. Устройство регулирования температуры воздуха в помещениях / К.В. Подмастерьев, О.С. Петрова // Датчики и системы, 2008. – № 6. – С.14-18.
5. Подмастерьев, К.В. Экспериментальные исследования эффективности устройства контроля и регулирования температуры воздуха в помещении [Текст] / К.В. Подмастерьев, О.С. Петрова // Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОрелГТУ. – 2009. - № 1. - С. 91-98.
6. Петрова О.С. Комплекс для исследования параметров температурного режима помещения оборудованного одноконтурной системой отопления: В сб. энерго - и ресурсосбережение XXI век - Материалы шестой международной научно-практической интернет-конференции, Орел.: Орел ГТУ, 2008. – С. 44-47.
7. Соколов, В.А. Автоматизация технологических процессов пищевой промышленности [Текст] / В.А. Соколов. – М.: Агропромиздат, 1991. – 445 с.
8. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов [Текст] / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2004. – 470 с.

Подмастерьев Константин Валентинович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Приборостроение, метрология и сертификация"
Тел. (4862) 419821
E-mail: E-mail: pms@ostu.ru

Петрова Ольга Сергеевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирантка кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация"
Тел. (4862) 419876
E-mail: lavanda777@bk.ru

УДК 620.179.1.082.7

В.В. МИШИН

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОДШИПНИКА
КАЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ФАКТОРА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПРИРАБОТКИ**

В статье предложена диагностическая модель электрического сопротивления подшипника с учетом пластических деформаций. Модель рассмотрена на микроуровне в рамках одного эллиптического пятна контакта тела качения и дорожки качения. Модель позволяет оценить электрическое сопротивление подшипника на этапе приработки с постепенным изменением реальной микрогеометрии до достижения равновесной шероховатости.

Ключевые слова: диагностирование, математическая модель, пластическая деформация, микронеровность, подшипник.

In article is offered the generalized diagnostic model of electric resistance of the bearing taking into account plastic deformations. The model is considered at microlevel within the limits of one stain of contact of the elliptic form. The model allows to estimate electric from the bearing at a stage extra earnings with gradual change of real micro geometry before achievement of an equilibrium roughness.

Keywords: diagnosing, mathematical model, plastic deformation, micro-roughness, bearing.

Электрическое сопротивление подшипника в настоящее время находит все большее применение в качестве диагностического параметра при реализации методов неразрушающего контроля. Однако многие известные модели процессов в зоне трения, являющиеся исходными для моделирования сопротивления подшипника (как качения, так и скольжения) часто не учитывают наличие значительных по температуре микровспышек в зонах контакта микронеровностей (наличие микроотжига и микроотпуска поверхностного слоя микронеровности) и возможность пластической деформации при этом самих микронеровностей. Задачей данной работы является предварительное формирование подхода к разработке математической модели сопротивления подшипника как диагностического параметра с учетом фактора пластической деформации вершин микронеровности. Так же предлагается ввести в модель обобщенный анализ временных трендов изменения упругой и пластической деформаций микронеровностей при приработке подшипника и их вклад в тренд изменения сопротивления подшипника во времени.

Моделирование электрического сопротивления подшипника качения традиционно проводится на трех основных уровнях: метауровень, макроуровень и микроуровень. На метауровне подшипник рассматривается как система, состоящая в простейшем случае из проводящих (детали подшипника) и диэлектрических (смазка и поверхностные слои) элементов с простейшей схемой замещения в виде одного или нескольких резисторов. На макроуровне процесс моделирования углубляется и подшипник представляется как сложная статическая или динамическая система с многокомпонентным построением. При этом эквивалентная схема замещения с точки зрения сопротивления подшипника представляет собой сложные цепи параллельно и последовательно включенных резисторов и конденсаторов (при учете динамических свойств). На макроуровне производится подробный силовой анализ подшипника как в статике, так и в динамике, т.е. определяются в зависимости от внешней приложенной нагрузки все силы, действующие на детали подшипника в их трибосопряжениях (пятнах контакта). На микроуровне, являющимся

логическим продолжением рассмотренных, сопротивление подшипника моделируется непосредственно в трибосопряжениях с учетом факторов микрогеометрии (субмикрогеометрии), поверхностных слоев, наличия «третьего тела» в трибосопряжении, фактической площади контактирования, фактической нагрузки в контактных зонах и в фактических пятнах микроконтактов, микровспышек температуры, микродеформаций и пр. аналогичных факторов.

Сопротивление подшипника при различных режимах трения лежит в очень широком диапазоне, который определяется множеством различных факторов. Например, в режиме жидкостной смазки сопротивление подшипника составляет от сотен кОм до десятков МОм. В режиме граничного трения сопротивление составляет от долей Ом до десятков кОм. Математические модели, позволяющие теоретически оценивать сопротивление подшипника обязательно учитывают режим трения подшипника, определяемый в свою очередь такими факторами как соотношение макро- и микрогеометрии рабочих поверхностей трибосопряжений в подшипнике, силового и скоростного режима работы подшипника, наличия и свойств смазочного материала и т.п. В настоящей работе сформулирован подход к моделированию сопротивления подшипника для режима граничного трения на микроуровне.

Режим граничного трения в трибосопряжении характеризуется трением элементов поверхностей деталей трибосопряжения практически без смазки. С учетом того, что реальные поверхности трения имеют значительные шероховатости, контактирование поверхностей трения трибосопряжения происходит по малой фактической площади, определяемой по различным методикам исходя из параметров микрогеометрии поверхности [1]. Для единичного эллиптического контактного пятна тела качения с дорожкой качения подшипника качения фактическую площадь контактирования можно определить с учетом следующих допущений и ограничений [1]:

- 1) Поверхности тел качения и дорожки качения имеют шероховатость и волнистость.
- 2) При контактировании первыми вступают во взаимодействие не самые высокие выступы, а те из них, которым противостоит на сопряженной поверхности такой выступ, что сумма высот выступа первой поверхности и противолежащего ему выступа второй поверхности окажется наибольшей.
- 3) По мере деформирования (упругого или пластического) выступов, удовлетворяющих допущению 2, в контакт будут вступать все новые пары микронеровностей, обладающих меньшей суммой высот.
- 4) Образующаяся при контакте фактическая площадь контактирования будет состоять из пятен контактирования, расположенных на различных высотах и под различными углами (рисунок 1).

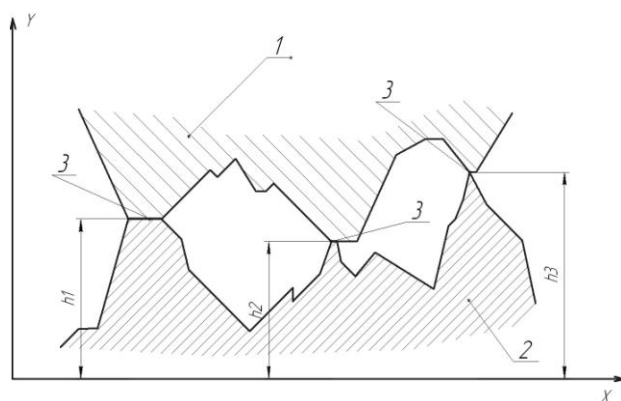
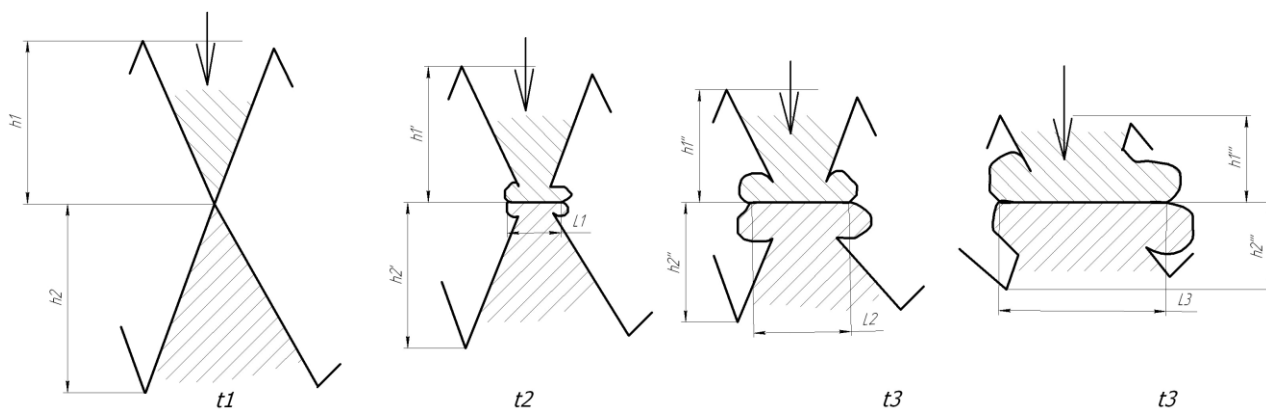


Рисунок 1 – Контакт шероховатых тел
 1- поверхность тела качения, 2- поверхность дорожки качения,
 3- зоны контакта (пятно контакта), h_i - высоты возникновения микроконтактов

- 5) Угол расположения пятна контакта по отношению к плоскости, параллельной поверхностям трения, мал по величине ($3-10^\circ$ [1]), поэтому можно условно допустить, что все площадки расположены в одной плоскости.

б) Процесс контактирования деталей подшипника целесообразно рассматривать как совокупность микроконтактирования единичных микровыступов. Контактное взаимодействие единичных выступов при граничном режиме трения происходит во времени дискретно и вероятность микроконтактирования определяется среднестатистической формой микронеровностей, статистическим распределением высоты микронеровностей, числом вероятных контактов в зоне контактирования трибосопряжения, величиной зоны контактирования, силовыми условиями работы трибосопряжения [2]. Контактное взаимодействие микронеровностей приводит к их упругой и пластической деформации. При пластической деформации материал, выдавливаемый с поверхности вершин микронеровностей, поступает во впадины между микронеровностями и постепенно заполняет их (рисунок 2). При этом происходит постепенное изменение средней величины высоты микронеровностей контактирующих поверхностей трибосопряжения и изменение площади (длины L) контакта единичной микронеровности.



$$h_1 > h_1' > h_1'' > h_1'''; \quad h_2 > h_2' > h_2'' > h_2'''$$

Рисунок 2 – Иллюстрация процесса пластической деформации единичной микронеровности

Процесс пластического «растекания» металла с вершин микронеровностей прекращается полностью при заполнении впадин пластически деформированным металлом [3]. Это критический случай, т.к. указанный процесс на практике стабилизируется до наступления момента полного заполнения впадин при достижении оптимального соотношения нагрузки, фактической площади контакта и предела текучести материала контактирующих поверхностей, т.е. достижения равновесной шероховатости контактирующих поверхностей подшипника. При контактировании микровыступов неровностей возможны изломы и открашивания их вершин, однако при этом продукты износа либо выносятся за пределы зоны контактирования, либо впрессовываются во впадины между микровыступами. При дальнейшем моделировании впрессованные частички принимаются во внимание аналогично пластически деформированным микронеровностям, а вынесенные за пределы зоны частицы в расчетах не учитываются, т.к. они не оказывают влияния на сопротивление подшипника непосредственно в зоне трения.

При контактировании микровыступов в форме удара возникают температурные вспышки до значительных значений температуры в микроне зоне контакта (до $t \geq 1000^\circ\text{C}$), что приводит к изменению свойств поверхностного слоя материала (микроотжиг и микроотпуск) и вызывает постепенное размягчение закаленной поверхности материала микровыступов и, соответственно, постепенно изменяется твердость поверхности контактирующих деталей [4,5]. Данные факторы действуют до возникновения равновесной шероховатости. В режиме работы трибосопряжения в середине жизненного цикла изделия и при стабильных условиях (нагрузка, скорость и т.п.) данным фактором можно пренебречь. Обычно на этапе приработки и в конце жизненного цикла подшипника (возникновение усталостных явлений, выкрашивания, коррозионных изменений) фактор становится определяющим в

формировании фактической площади микроконтактирования и, соответственно, сопротивления подшипника.

С учетом вышесказанного по теории для сопротивления стягивания (теория Хольма) можно определить сопротивление одного эллиптического контакта тела качения и дорожки качения кольца подшипника. С учетом наличия нескольких тел качения и двух колец определяется общее сопротивление подшипника в режиме граничного трения.

Важным вопросом при оценке сопротивления контакта является наличие поверхностного слоя на элементах трибосопряжения (окисные пленки, окалина и карбидные соединения от микроотжига, примеси, вода и прочие составляющие). Для учета данного фактора в модели необходимо рассмотреть физико-химические свойства поверхностного слоя при расчете сопротивления по теории Хольма (в данной работе не рассматриваются).

Процесс формирования электрического сопротивления пропорционально определяется фактической площадью контактирования, которая, в свою очередь, определяется процессом деформации единичных выступов (рисунок 1). В рассматриваемой математической модели предлагается использовать теорию Н.Б.Демкина [1], согласно которой фактическая площадь определяется в зависимости от вида геометрической модели вершин микронеровностей (сфера, конус, цилиндр и т.д.). При этом возможно четыре вида деформации микронеровностей: 1) упругая, 2) пластическая, 3) упруго - пластическая без упрочнения материала,

4) упруго – пластическая с упрочнением (наклеп). Процесс упругой деформации удобно рассматривать в рамках теории Г.Герца с учетом следующих допущений: контактирующие поверхности изотропны, в рамках упругого контактирования выполняется закон Гука, геометрический размер площадки минимален по отношению с радиусами кривизны контактирующих микронеровностей и вектор нагрузки нормален к поверхности площадки контактирования.

Как видно, данные допущения с учетом вышеизложенного применимы к моделированию процессов микроконтактирования в подшипниках качения. Для сферической модели микронеровности радиус площадки контактирования, определяющей сопротивление контакта, определяется как

$$r = 0.9 \sqrt{\frac{R1R2}{R1 + R2} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) N}, \quad (1)$$

где $R_{1,2}$ – радиус сферы; μ - коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга; N – нормальная нагрузка.

Второй характеристикой, определяющей сопротивление контакта с учетом целостности или разрушения поверхностных пленок и слоев, является максимальное давление в контакте микронеровностей:

$$P_{max} = 0.58 \sqrt{\frac{R1 + R2}{R1R2} \frac{N}{\left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}}, \quad (2)$$

Если $P_{max} > [P]_{нов}$ – предельное выдерживаемое поверхностными слоями и пленками давление, то осуществляется контакт металл- металл. В обратном случае при расчете сопротивления необходимо учитывать электрические (часто диэлектрические) свойства поверхностных граничных слоев и пленок.

Сближение поверхностей оценивается как:

$$a = 0.825 \sqrt[3]{\frac{R1R2}{R1 + R2} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) N^2}. \quad (3)$$

Оценка сближения контактирующих поверхностей позволяет итерационно уточнить распределение нагрузки в подшипнике с учетом контактирования шероховатых

поверхностей тел качения и дорожек колец. Это особенно актуально для прецизионных подшипников. В различных исследованиях рассмотрены аналитические выражения для оценки r , P , a при других моделях микронеровностей.

При циклическом обкатывании шариками дорожки качения в зоне нагружения подшипника, происходит общая деформация поверхностного слоя шероховатой поверхности тела качения и дорожки качения, что приводит к упрочнению (наклепу) поверхностного слоя, однако микрошероховатость при этом сохраняется. Поэтому при моделировании сопротивления подшипника в динамике всегда необходимо учитывать наличие шероховатости.

Упруго – пластическое деформирование микронеровностей определяется соотношением предела текучести материала элементов трибосопряжений и реальными напряжениями в контактных зонах. Число микронеровностей с упругой деформацией и число микронеровностей с пластической деформацией определяется исходя из критического сближения, необходимого для перехода микровыступа от упругой к пластической деформации. По [1] критическое сближение (применяемое для практических расчетов ориентировочное значение):

$$a_{\text{сб}} = 5.35 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2 \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot \tilde{N}^2 \cdot \sigma_s^2, \quad (4)$$

где $C=1 \dots 4,7$ в зависимости от угла между нормалью к основанию микронеровности и образующей (для реальных поверхностей $C = 2,6 \dots 3,1$), σ_s – предел текучести.

По данным [1] для поверхностей высокого класса доля упруго деформируемых выступов значительна, однако для большинства реальных поверхностей на начальном этапе работы трибосопряжения (приработке) большинство микронеровностей деформируются пластически, поэтому упругой деформацией можно пренебречь. При нормальной работе подшипника деформацию следует считать как преобладающую упруго-пластическую.

Переходя к контакту в области эллипса (контура) контакта тела качения и дорожки качения фактическая площадь касания определяется рассмотренными факторами и зависит от номинальной и контурной площадей контакта. Следует также учитывать число вероятных микроконтактов. В подшипниках качения величина номинальной площади контакта определяется размерами герцевских площадок – эллипсов контакта шариков и дорожек качения. Фактическая площадь контакта обычно составляет от номинальной десятые и сотые доли процента, а контурная – несколько процентов. В первом приближении можно допустить, что в пределах фактической площади контакта непроводящих пленок и включений нет, и она вся электропроводна. Тогда электрическое сопротивление фрикционного контакта будет определяться его фактической площадью.

На рисунке 3 показана схема фрикционного контакта твердых тел с номинальной площадью, принимаемой за эллипс контакта. Для моделирования сопротивления на этапе приработки подшипника с учетом преобладания пластической деформации нагрузка на единичный микровыступ определяется как [1]:

$$N_i = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_{\text{max}} C \sigma_s \varepsilon_i. \quad (5)$$

Соответственно сближение в зоне контакта при пластическом контакте составит:

$$\varepsilon = \left(\frac{N}{C \sigma_s A_c b} \right)^{1/\nu}, \quad (6)$$

где b, ν – коэффициенты, характеризующие кривую опорной поверхности и учитывающие реальную микрогеометрию.

Относительная площадь составит:

$$\eta_{\text{факто}} = \frac{N}{A_c C \sigma_s} = \frac{q_s}{C \sigma_s}, \quad (7)$$

где $q_s = \frac{N}{A_c}$ – удельная контурная нагрузка в контакте.

В практических расчетах принимается равенство $C \sigma_s = HB$, где HB – твердость контактирующих поверхностей по Бринеллю. С учетом этого сближение контактирующих поверхностей тела качения и дорожки качения в номинальном контуре эллипса контакта определяется как:

$$\varepsilon = \left(\frac{N}{HB \cdot A_c b} \right)^{1/\nu}, \quad (8)$$

а относительная и фактическая площади контактирования соответственно:

$$\eta_{\text{факто}} = \frac{q_s}{HB}, \quad A_r = \frac{N}{HB}, \quad (9)$$

Таким образом, на этапе приработки подшипника за преобладающую деформацию в зоне эллиптического контакта тела качения и кольца подшипника принята пластическая

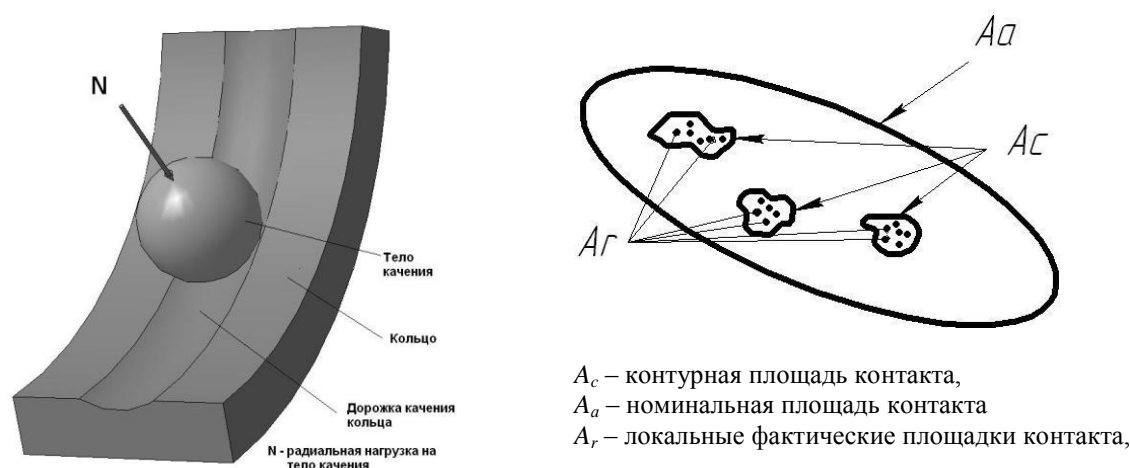


Рисунок 3 – Схема фрикционного контакта в эллипсе контакта тела качения (шарика) и дорожки качения кольца

деформация и фактическая площадь контакта может рассматриваться через коэффициент, учитывающий зависимость напряженного состояния от формы микронеровностей. Данное положение нельзя использовать при моделировании сопротивления подшипника в нормальном режиме работы, т.к. пластическая деформация микровыступов становится малозначимой и преобладающими видами является упруго-пластическая и упругая деформация. Наличие пластического деформирования микронеровностей так же можно оценить через соотношение напряжения в микронеровности, превышающее значение $1,06 \sigma_s$. Так же при моделировании сопротивления в процессе приработки следует учитывать временное изменение величин коэффициентов b, ν [5]. Например, для подшипника, вышедшего с производства и не прошедшего приработку значение коэффициентов b, ν соответственно составит 1,5-4 и 1,7-3. В процессе приработки значения изменяются до значений 2,2 и 2 соответственно [5]. Процесс приработки можно считать завершенным, когда соотношение пластически деформируемых микронеровностей к общему числу микронеровностей минимизируется и стабилизируется. Для теоретического анализа критерия перехода от упругого контактирования к пластическому применяются так

называемый индекс пластичности и параметр КК [7]. При использовании индекса пластичности $\psi > 1$ контакт считается пластичным, при $\psi < 0,6$ контакт упругий. Аналогично параметр КК $> 1,74$ характеризует 95% упругих контактов в общей фактической площади контакта, а значение КК $< 0,7$ говорит о преобладании (более 95%) пластических контактов. Промежуточные значения характеризуют упруго-пластические взаимодействия.

Число z вероятных контактов рабочих поверхностей при их сближении определяется как [6]:

$$z = \frac{A_c \cdot F_1 \cdot F_2}{\pi \cdot r_{np} \cdot r_{non}} \cdot K_2 \cdot \varepsilon^{m_1}, \quad (10)$$

где K_2 – коэффициент, учитывающий способ обработки поверхностей; для шлифованных деталей $K_2=0,002$, r_{i0}, r_{i1} – соответственно радиусы закругления вершин микронеровностей в продольном и поперечном направлении, m_1 – коэффициент, учитывающий структурные параметры неровностей поверхности, $F1, F2$ – коэффициенты, учитывающие качество обработки контактирующих поверхностей.

Рассмотренные выше теоретические положения позволяют создать диагностическую модель, описывающую сопротивление подшипника при наличии пластически деформируемых микровыступов на этапе приработки. Рассматривая фрикционный контакт в целом его сопротивление можно представить как [8]

$$R = R_M + R_{OP} + R_{CT} + R_{СП}; \quad (11)$$

где $R_M, R_{OP}, R_{CT}, R_{СП}$ – соответственно, сопротивление контактирующих тел, окисных пленок, стягивания и смазочных пленок. Исходя из вышеуказанного предположения о неучете смазочных и окисных пленок в рассматриваемой модели основными составляющими сопротивления будут сопротивление контактирующих тел и сопротивление стягивания. Расширением рассматриваемой модели является учет гидродинамического (эластогидродинамического) смазочного слоя и наличия пленок различной физико-химической природы в зонах фактического контакта. Сопротивление R_M определяется удельным сопротивлением материалов деталей пары трения, которое для подшипниковых сталей составляет порядка $10^{-7} \dots 10^{-6}$ Ом. Эта составляющая ничтожно мала по сравнению с остальными составляющими.

Сопротивление R_{CT} возникает при искажении линий тока в сечениях контактирующих тел (стягивание у вершин неровностей). Оно определяется размерами и числом пятен контакта в пределах номинальной и контурной площадей (зависимость 10). Сопротивление стягивания в рассматриваемой модели предлагается определять как [8,9]:

$$R_{\bar{N}0} = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{1}{i_r \cdot r_{B(H)}} + \frac{32}{3 \cdot \pi^2 \cdot n_r \cdot a_K} + \frac{32}{3 \cdot \pi^2 \cdot r} \right); \quad (12)$$

где n_r – число групп пятен металлического контакта (кластеров) – в первом приближении можно принять равным z по выражению (10); r – радиус контура, охватывающего совокупность кластеров.

В этой формуле, наряду с составляющей сопротивления стягивания, обусловленной стягиванием к единичным пятнам, учитываются составляющие от взаимодействия пятен в их группе (кластере) и от взаимодействия кластеров в общей площади контакта (три слагаемых) [8,9,10]. При расчете первого слагаемого принимается, что выступы неровностей имеют эллипсоидальную форму и расположены на поверхности равномерно. При расчете второго слагаемого предполагается, что кластеры образуются из-за поверхностей трения. Третье слагаемое определяется аналогично второму в предположении, что взаимодействие кластеров в номинальной площади контакта оценивается так же, как и взаимодействие пятен в кластере.

В работающем в нормальных условиях шарикоподшипнике определяемая из теории Герца контурная площадь контакта мала. Упругие свойства материалов и наличие устойчивых гидродинамических смазочных пленок делают сближения поверхностей трения незначительными, а вероятность одновременного появления в зоне трения большого числа пятен металлического контакта, объединенных в кластеры, невысокой. Поэтому влияние второго и третьего членов выражения (12) на значение $R_{\bar{N}\dot{\delta}}$ будет несущественным и при расчетах $R_{\bar{N}\dot{\delta}}$ для шарикоподшипника, работающего в нормальном режиме после приработки, можно ограничиться только первым слагаемым выражения (12). Такая модель сопротивления подшипника известна и обоснована в работе [8].

Однако на этапе приработки в случае постепенных пластических деформаций микронеровностей указанное выше предположение не может применяться и в выражении (12) должны оцениваться все рассмотренные составляющие. Для упрощения расчетов по рекомендации источника [7] выражение (12) трансформируется в упрощенное только для пластического контакта:

$$R_{\bar{N}\dot{\delta}} = 0.899\rho \left(\frac{HB}{N} \right)^{0.5}, \quad (13)$$

Рассмотренные теоретические зависимости позволяют теоретически определить значение электрического сопротивления подшипника качения на этапе его приработки при значительных пластических деформациях вершин микронеровностей. Исследование сопротивления как временной функции по представленным зависимостям позволит разработать новые группы динамических диагностических параметров, характеризующих состояние процесса приработки подшипника. При использовании вероятностного подхода указанный набор теоретических зависимостей позволяет перейти к вероятностной модели электрического диагностического параметра НИВ [2] на этапе приработки подшипника. Настоящая статья не претендует на полноту освещения вопроса и позволяет только наметить путь создания диагностической модели подшипника качения на этапе его приработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демкин, Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей [Текст]/Демкин Н.Б. – Москва: Издательство Академии наук СССР, 1962 г – 110 с.
2. Подмастерьев К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст]/К.В. Подмастерьев – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
3. Шнейдер Ю.Г. Чистовая обработка металлов давлением [Текст]/Ю.Г. Шнейдер – М.:Машиностроение, 1963. – 273 стр.
4. Сергеичев А.В. Использование температуры вспышки в качестве критерия при выборе на стадии проектирования антифрикционных материалов и покрытий трибосопряжений/ Сергеичев А.В. и др. //Трение и износ. – 2005 –Том 26, №2 – С159-165.
5. Польцер Г. Основы трения и изнашивания [Текст]/Польцер Г., Майснер А. // Под. ред. М.Н.Добычина – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
6. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин [Текст]/Э.В.Рыжов - М.: Машиностроение, 1966. - 194 с
7. Свириденко А.И. Механика дискретного фрикционного контакта [Текст] / Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. – Мн: Навука і тэхніка, 1990 – 272 с.
8. Марков В.В. Электрорезистивный метод и средства диагностирования подшипников качения [Текст]: Дисс... канд. техн. наук – Орел, 2004. – 239 с.
9. Мышкин Н.К. Контакт шероховатых тел и его проводимость [Текст]/ Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. // Трение и износ.– 1983. – Т. 4. – № 5. – С. 845-853.
10. Кончиц В.В. Триботехника электрических контактов [Текст] / В.В. Кончиц, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 256 с.

Мишин Владислав Владимирович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
 Канд.техн.наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
 Тел. (4862)41-98-76
 E-mail: vlad89290@gmail.com, vm@rbcmail.ru

В.И. КОМОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ЭКСТРАКЦИИ ВАНАДИЯ (V) В СИСТЕМЕ 5,7- ДИБРОМОКСИХИНОЛИН В СМЕСИ РАСТВОРИТЕЛЕЙ В ЦЕЛЯХ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ СТОЧНЫХ ВОД ТИТАНО-МАГНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА СОДЕРЖАНИЕ ИОНОВ ВАНАДИЯ (V)

Установлено, что извлечение ванадия (V) хлороформным раствором ДБО значительно возрастает в присутствии небольших добавок гексилового спирта и три-н-бутилфосфата, отмечено наличие синергетического эффекта в изучаемой системе.

Ключевые слова: экстракция, синергизм, коэффициент распределения, константа экстракции, константа устойчивости, комплексное соединение.

It is established, that extraction of vanadium (V) chloroformic solution DBO considerably grows at the presence of small additives hexyl spirit and three-n-butylphosphate, presence synergetic effect in investigated system is marked.

Key words: extraction, synergism, distribution coefficient, extraction constant, steadiness constant, complex compound.

В аналитической химии, синергетические системы представляют большой интерес, особенно с практической точки зрения. Наличие синергетического эффекта способствует росту степени извлечения экстрагируемого вещества в органическую фазу [1,2]. При этом происходит увеличение коэффициентов распределения, а следовательно и констант экстракции, улучшается кинетика экстракции, что отмечается и в системе ванадий (V) – ДБО в смеси растворителей. Это в свою очередь, приводит к повышению чувствительности экстракционно-фотометрического определения ванадия (V) [3].

В процессе получения пятиокси ванадия образуются сточные воды, содержание ванадия в которых колеблется от 0,1 до 3 г/л. В связи с высокой токсичностью соединений ванадия, остро встает задача организации оперативного аналитического контроля за содержанием его в сточных водах.

Продукция цветной металлургии разнообразна и сложна по своему составу. Это обусловило малую степень автоматизации аналитического контроля в цветной металлургии. Наряду с появлением новых видов продукции, усовершенствованием технологических процессов, по-прежнему много внимания уделяется разработке методов анализа сточных вод промышленных предприятий.

Для подтверждения взаимодействия ванадия (V) с 5,7- дибромоксихинолином (ДБО) были сняты спектры поглощения экстрактов, состоящих из соединений ванадия (V) с ДБО в хлороформе, гексаноле и смеси растворителей гексанол-хлороформ (1:2), а также спектры поглощения ДБО в смеси растворителей (рисунок 1).

Максимальное светопоглощение наблюдается при $\lambda = 410$ нм для комплекса с ванадием. В области 480 – 490 нм появляется второй максимум. Для изучения комплексообразования в данной системе более целесообразно использовать максимум полосы при 410 нм, так как в условиях первого максимума наблюдается незначительное поглощение самого реагента.

Нами была изучена зависимость коэффициента распределения ванадия (V) от

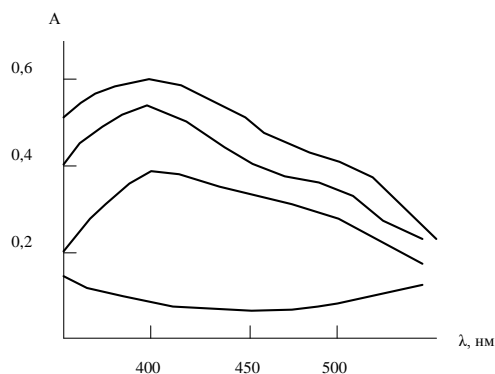


Рисунок 1 – Спектры поглощения комплексных соединений ионов ванадия (V) с ДБО в различных растворителях

кислотности водной фазы (рисунок 2). Экстрагирование комплексного соединения производили в интервале рН от 0 до 7 при постоянной концентрации иона ванадия (V) и 5,7-дибромоксихинолина смесью растворителей гексанол – хлороформ (1:2). Максимальное извлечение ванадия (V) в органическую фазу наблюдается при рН = 2,0, которое и было выбрано в дальнейшей работе в качестве оптимального. Однако в интервале рН = 2,0 – 4,0 экстракция может осуществляться количественно. Сопоставление экспериментальных экстракции прямым и обратным методами показало, что полученная зависимость коэффициента распределения ванадия (V) от рН водной среды является кинетической, максимум которой приходится на рН = 2,0.

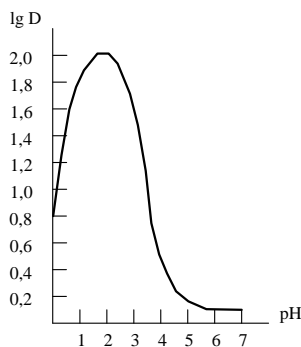


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента распределения ванадия (V) в системе ДБО – гексанол – хлороформ от рН водной фазы

Для установления состава изучаемого комплекса были использованы кривые насыщения, полученные путем исследования зависимости интенсивности окраски комплекса при постоянной концентрации ионов металла и переменной концентрации реагента. Для этого в ряд делительных воронок вводили определенное количество раствора ванадия, переменный объем раствора реагента, буферный раствор. После встряхивания и разделения фаз, экстракт переводили в мерную колбу на 25 мл, доводили до метки органическим растворителем и перемешивали. Оптическую плотность растворов измеряли при выбранной ранее оптимальной длине волны. Из полученных данных рассчитывали состав образующегося комплексного соединения по методу сдвига равновесия. Анализ экспериментальных данных позволил установить наличие одного комплексного соединения, отвечающего соотношению компонентов Me:R (1:2).

С помощью метода сдвига равновесия была оценена константа устойчивости данного комплексного соединения.

Было установлено, что в случае экстракции ванадия (V) ДБО в хлороформе, коэффициенты распределения невелики. Предварительные опыты по экстракции комплекса ванадия (V) с ДБО неразбавленным гексиловым спиртом показали, что полного извлечения его в органическую фазу также не происходит. Полученные экспериментальные данные представлены в таблице 1.

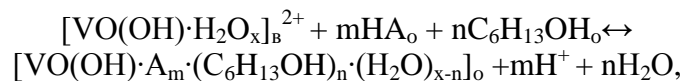
Таблица 1– Влияние различных параметров на экстракцию соединения ванадия (V) с ДБО гексиловым спиртом

Время экстракции (мин)	$r = \frac{V_0}{V_B}$	E, % извлечения ванадия (V) в органическую фазу
2	1	48
5	1	79
10	1	79
5	2	83
10	2	83

Изучая экстракционное равновесие в системе ванадий (V) – ДБО – гексанол – хлороформ, было установлено, что извлечение ванадия (V) хлороформным раствором ДБО значительно возрастает в присутствии небольших добавок гексилового спирта. При этом наблюдается рост коэффициентов распределения ванадия (V) между двумя несмешивающимися фазами. Наблюдаемый эффект можно объяснить образованием смешанного комплекса. Рассматривая ДБО в качестве хелатирующего реагента для ионов ванадия (V), гексанол следует представить как второй активный компонент, который способен вытеснить

оставшиеся координированные молекулы воды из внутренней координационной сферы формально нейтрального комплекса, и, таким образом, делать его менее гидрофильным.

Учитывая изложенное, схему экстракционного процесса можно представить следующим образом:



тогда

$$K_{\text{экс}} = \frac{[\text{VO}(\text{OH})\cdot\text{A}_m\cdot(\text{C}_6\text{H}_{13}\text{OH})_n\cdot\text{H}_2\text{O}_{x-n}]_o \cdot [\text{H}^+]^m}{[\text{VO}(\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{O}_{x-n}]_{\text{B}} \cdot [\text{HA}]_o^m \cdot [\text{C}_6\text{H}_{13}\text{OH}]_o^n}.$$

Для определения числа молекул каждого из реагентов, входящих в состав комплекса с ванадием (V), были построены билогарифмические зависимости коэффициента распределения от концентрации как хелатирующего, так и сольватирующего компонентов, сохраняя попеременно концентрацию одного из них постоянной. Полученные данные позволили заключить о наличии одного комплексного соединения состава $[\text{VO}(\text{OH})\cdot\text{A}_2\cdot(\text{C}_6\text{H}_{13}\text{OH})_n\cdot\text{H}_2\text{O}_{x-1}]$.

С ростом концентраций изучаемых компонентов, наблюдается отклонение от линейности, что объясняется усилением процесса ассоциации реагентов в органической фазе.

В силу того, что было установлено наличие одного комплексного соединения, то в этом случае справедливо следующее соотношение:

$$\lg D = \lg K_{\text{экс}} + 2\lg[\text{HA}]_o + \lg[\text{C}_6\text{H}_{13}\text{OH}]_o + 2\text{pH},$$

где D – коэффициент распределения ванадия (V);

$[\text{HA}]_o$ – равновесная концентрация ДБО в органической фазе;

$[\text{C}_6\text{H}_{13}\text{OH}]$ – равновесная концентрация гексилового спирта в той же фазе;

m и n – число молекул ДБО и гексанола, соответственно входящих в состав экстрагируемого комплекса.

Была проведена экстракция ванадия (V) в системах ДБО – ТБФ – гексанол; ДБО – ТГФ – хлороформ; ДБО – МИБК – хлороформ. В выборе этой группы растворителей учитывалось несколько моментов. Исследуемые растворители относятся к группе нейтральных реагентов. Реагенты этого типа обладают высокой сольватирующей способностью по отношению к неорганическим веществам, но имеют относительно небольшие дипольные моменты. Нами был выбран в качестве инертного разбавителя хлороформ. Однако в системе ДБО – ТБФ – хлороформ было замечено, что разбавление три-н-бутилфосфата хлороформом заметно уменьшает степень экстракции ванадия (V). Поэтому был взят второй активный растворитель – гексиловый спирт.

Нами были сняты зависимости $\lg D$ – pH при экстракции ванадия (V) ДБО в гексаноле, ДБО в три-н-бутилфосфате и ДБО в смеси ТБФ – гексанол (1:6). Соотношение растворителей было определено предварительными опытами. Наблюдаемый рост коэффициентов распределения ванадия (V) можно объяснить действием смеси растворителей. Из экспериментальных данных оценено значение константы экстракции $\lg K_{\text{экс}} = 5,2$.

Три-н-бутилфосфат был заменен на тригексилфосфат. Представляло интерес оценить экстракцию ванадия (V) в данном случае, при введении в органический растворитель (хлороформ) тригексилфосфата (ТГФ), в качестве донорно-активной добавки. Было замечено, что введение добавок ТГФ в хлороформ приводит к росту коэффициента распределения ванадия (V). Из экспериментальных данных оценено значение константы экстракции $\lg K_{\text{экс}} = 1,46$.

Применение метилизобутилкетона (МИБК) в качестве донорно-активной добавки в хлороформ также позволяет повысить степень извлечения ванадия (V) в органическую фазу. Была рассчитана константа экстракции $IgK_{\text{экс.}} = 1,29$.

Сравнивая экстрагирующую способность изученных нами экстракционных систем (таблица 2), следует заключить, что наибольший интерес в экстракционном варианте представляют системы:

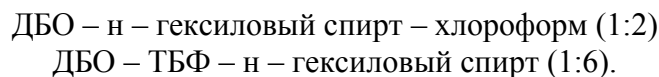


Таблица 2 – Физико-химические характеристики комплексных соединений ионов ванадия (V) с ДБО в органической среде

Реагент	Оптимальная кислотность среды	λ , нм	Me:R	$K_{\text{уст.}}$	$IgK_{\text{экс.}}$	Смеси растворителей
ДБО	2	410	1:2	$(2,26 \pm 0,06) \cdot 10^5$	5,6	гексанол-хлороформ (1:2)
					5,2	ТБФ-гексанол (1:6)
					1,46	ТГФ-хлороформ
					1,29	МИБК-хлороформ

Следовательно, полученные физико-химические характеристики свидетельствуют о возможности применения ДБО в качестве реагента для определения малых содержаний ванадия (V). Образующее соединение достаточно устойчиво. Развитие максимальной окраски комплексного соединения наступает быстро и окраска устойчива в течение длительного времени (месяца). Применение смеси растворителей приводит к повышению стабильности комплекса, быстро устанавливается экстракционное равновесие.

На основании изучения взаимодействия ионов ванадия (V) с ДБО в смеси растворителей, предложен экстракционно-фотометрический метод определения ванадия (V) в растворах. Метод применим для довольно широкого диапазона определяемых содержаний: от 0,20 мкг/мл до 30 мкг/мл и был использован для определения ионов ванадия (V) в сточных водах титано-магниевого производства [4], отличающийся высокой чувствительностью и воспроизводимостью, предусматривающий использование несложной аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф.Умланд, А. Янсен "Комплексные соединения в аналитической химии". М., "Мир", 1975.
2. H. Jrvinq, D.N.J. Edinqton Jnorq. Nuclear chim.,15, 1960, p.158-170.
3. Дубровина Л.Т., Комова В.И., Лугинин В.А., Церковницкая И.А. Об экстракции ионов ванадия (V) в системе 5,7-дибромоксихинолин – гексанол – хлороформ / Л.Т. Дубровина, В.И. Комова, В.А.Лугинин, И.Н. Церковницкая //ЛГУ им. А.А.Жданова. – Л., ЛГУ, 1987. – Деп. ВНИИТэхим 03.02.87, № 89-ХИ-87.
4. Комова В.И. Определение ванадия (V) в сточных водах титано-магниевого производства экстракционно-фотометрическим методом /В.И. Комова //Известия ОрелГТУ.– Серия "Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии" - №4-3/268 (535). –2007.– С.141-143.

Комова Вера Ивановна

Кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия»
 Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Тел.(4862)419892;
 E-mail: chemistry@ostu.ru

Е.Л. МАЛИНОВСКИЙ, А.В. ДУНАЕВ

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ И ТКАНЕВОЙ ОКСИМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НИЗКОИНТЕНСИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРАПИИ

Рассматриваются основные механизмы взаимодействия низкоинтенсивного лазерного излучения с биотканями и возможности использования оптических методов диагностики – фотоплетизмографии и тканевой оксиметрии – в качестве методов контроля и оценки эффективности низкоинтенсивной лазерной терапии.

Ключевые слова: низкоинтенсивная лазерная терапия, неинвазивная оптическая диагностика, фотоплетизмография, оптическая тканевая оксиметрия, контроль.

There are considered basic mechanisms of interaction of the low level laser radiation with biological tissues as well as possibilities of utilization of optical methods of diagnostics – photoplethysmography and reflectance tissue oximetry – as methods of control and assessment of effectiveness of the low level laser therapy.

Key words: low level laser therapy, non-invasive optical diagnostics, photoplethysmography, tissue reflectance oximetry, control.

На современном этапе развития отечественной и зарубежной медицины, в течение последних двух десятилетий, выделилось новое, приоритетное направление физиотерапии – низкоинтенсивная лазерная терапия (НИЛТ). Благодаря ряду специфических свойств лазерного излучения (монохроматичность, малая расходимость луча, пространственная и временная когерентность) реализуется высокая плотность мощности электромагнитного оптического излучения при относительно малых затратах энергии, что и обеспечило успешное применение лазерных технологий в медицине и биологии. И если механизмы воздействия на биологические ткани высокоинтенсивных лазерных источников и соответствующего класса приборов в виде так называемого «лазерного скальпеля» не вызывают сомнений, то механизмы действия низкоинтенсивного лазерного излучения (НИЛИ) на биологические объекты, включая и организм человека, являются предметом споров и по настоящее время.

Спорными также остаются и вопросы режимов НИЛИ на процедурах НИЛТ. Отсутствие согласия в этом вопросе среди специалистов – лазерных терапевтов, отражает в конечном итоге отсутствие четких представлений о механизмах воздействия НИЛИ на организм человека; в практическом же плане это выражается одновременным наличием взаимоисключающих по своей сути рекомендаций по назначению «лечебных» режимов лазерного излучения, отличающихся в разы, а порой и несколько порядков. Например, рекомендуемые значения плотности мощности и энергетической экспозиции («дозы») в различных руководствах по лечебному использованию НИЛИ находятся в диапазоне значений от 0,5 до 200 мВт/см² и от 0,1 до 120 Дж/см², соответственно /1/.

Процесс внедрения технологий лазерной терапии в клиническую медицину показывает, несомненно, существенные достижения: использование технологий НИЛТ значительно расширило список курабельных заболеваний как для общей физиотерапии, так и в аспекте монолазерных и фармаколазерных методов терапии самых различных, а подчас – малокурабельных ранее заболеваний и синдромов. Уже хрестоматийными являются примеры монолазерной терапии больных язвенной болезнью желудка и двенадцатиперстной кишки, острой и хронической пневмонией, инфарктом миокарда и системным атеросклерозом с получением выраженного положительного клинического эффекта в краткие сроки, недоступные для остальных методов терапии.

Однако, при изучении клинических эффектов НИЛТ, обращают внимание неоднозначные результаты курсовой лазерной терапии больных различных нозологических и возрастных групп, включающие не только положительные исходы, но также и нежелательные последствия в виде отсутствия какой-либо положительной динамики (при лечении курабельных заболеваний и синдромов) или же возникновения отрицательных реакций при проведении курсовой лазерной терапии /2/. Доля таких нежелательных реакций в общей структуре результатов НИЛТ достигает 20-30 %, причем в научной медицинской литературе соответствующего профиля по этой тематике встречаются лишь единичные публикации /3-6/. Игнорирование этой проблемы широким кругом специалистов может объясняться отсутствием в широкой медицинской практике информации о наличии достоверно значимых методик определения оптимальных процедурных и курсовых режимов лазерной терапии.

Безусловно, попытки разрешения этой проблемы предпринимались в течение всего периода активного внедрения технологий НИЛТ, особенно на ранних этапах. Большинство из предложенных способов прогнозирования результатов НИЛТ в практическом плане оказались неэффективными. Причиной тому послужили следующие факторы:

– большинство диагностических методик базировалось на отслеживании отдельных молекулярных или физиологических процессов, лишь в небольшой степени и недостоверно (за счет нелинейности процессов в биологических системах) отражающих реакцию целостного организма. В этом плане необходимо заметить, что попытки отследить состояние биосистемы на системном и организменном уровне по состоянию его частных процессов (в соответствии с утверждением о параллелизме процессов в биосистеме частного и общего уровней) в меньшей степени характерно для больного организма с наличием дисбаланса как на уровне регулирующих систем, так и на уровне отдельных органов и систем органов;

– неуспешность методик прогнозирования результатов НИЛТ в соответствии со значениями различных лабораторных или инструментальных показателей, регистрируемых до или после выполнения лечебных процедур связана, в первом случае, с невозможностью (или же малой эффективностью) прогнозирования реакции организма в процессе воздействия на него фактора НИЛИ по параметрам биосистемы, находящейся в состоянии относительного покоя, во втором случае, при выполнении диагностики после проведения лечебной процедуры методика теряет свое прогностическое значение, так как ее единственной prerogative является констатация «уже свершившихся фактов». В настоящее время вполне очевидно, что основные лазер-индуцированные процессы реализуются в динамике воздействия на организм факторов НИЛИ, а потому наибольшую эффективность приобретают диагностические методики мониторингового типа, отслеживающие особенности и характер реакций биосистемы на протяжении лечебной процедуры.

В соответствии с современными представлениями, механизмы взаимодействия энергии НИЛИ с биологическими объектами последовательно реализуются на всех структурных уровнях биосистемы.

На начальных этапах взаимодействия НИЛИ с биообъектом, падающая энергия лазерного излучения поглощается атомами, что порождает в этих атомах первичные фотофизические реакции. Суть этих фотофизических реакций заключается в переходе электронов с энергоненасыщенных на энергонасыщенные орбитали. Рассматривая данный этап взаимодействия НИЛИ с биообъектом уместно вспомнить о наличии фотоселективности ряда молекул, избирательно поглощающих фотоны вполне определенного спектрального диапазона. Электрон не пребывает длительно на энергонасыщенном уровне и достаточно быстро возвращается в первоначальное, гипонергетическое состояние, перемещаясь при этом на энергоненасыщенный уровень. Переход сопровождается испусканием кванта энергии (и не обязательно такого же спектрального диапазона и энергетической величины), порождая таким образом каскад вторичных фотофизических реакций среди молекул селективного и неселективного типа спектральной чувствительности. Масштабность этих процессов можно представить по таким

фактам: ежесекундно при воздействии на биологический объект происходит активация 10^{10} атомов, скорость же захвата атомом кванта света находится во временном диапазоне 10^{-15} - 10^{-16} с.

Следующим этапом реакции биообъекта на воздействие НИЛИ является запуск каскада фотохимических реакций, приводящих к активации различных типов молекул, как селективно чувствительных к свету данного спектрального диапазона, так и молекул, активированных при вторичных фотофизических реакциях, находящихся вне зоны селективной чувствительности. Молекулы, вовлекаемые в эти процессы весьма разнообразны, и их перечисление не входит в наши задачи, поэтому остановимся отдельно на наиболее важных молекулярных процессах. В качестве первичных молекулярных акцепторов лазерного света установлены молекулы, участвующие в процессах тканевого дыхания (НАД, НАДФ+ и др.). Активация молекул этого типа приводит к активации синтеза аденозинтрифосфата, являющегося, по сути, энергообеспечивающим субстратом всей деятельности организма как на клеточном и субклеточном уровне (обеспечение молекулярных процессов, деления клеток, активного транспорта через клеточную мембрану), так и на надклеточном уровне (обеспечение функциональной активности органов и систем органов, сокращения скелетных и гладких мышц и т.д.). Этот момент взаимодействия лазерного излучения с биосистемой является ключевым. Имеющиеся сведения об особенностях энергетического метаболизма в больном организме и влияния НИЛИ на энергообменные процессы объясняет высокую эффективность лазерной терапии при лечении самой различной нозопатологии.

Итак, для нормального функционирования организма на всех уровнях его структурной организации, необходима энергия, аккумулируемая в связях молекулы аденозинтрифосфата. В здоровом организме энергообеспечение всех необходимых процессов находится на адекватном уровне. При хронических же болезненных состояниях организм постепенно переходит в гипоэнергетическое состояние, связанное с дефицитным количеством АТФ, развивающимся вследствие частичного блокирования доступа к субстратам окисления для синтеза АТФ, а также рассогласованностью внутриклеточных процессов, влекущих за собой блокирование окислительного фосфорилирования в системе синтеза молекул аденозинтрифосфата.

Следствием гипоэнергетических состояний является жесткое распределение биосистемой насущных энергетических ресурсов. Приоритетными в этом распределительном списке являются молекулярные и физиологические процессы, имеющие непосредственное отношение к выживанию биосистемы. Остальные же молекулярные и функциональные системы, деятельность которых не ориентирована непосредственно на обеспечение таких жизненно важных процессов и функций, находятся в списке распределения энергетических ресурсов последними или же, при критичных ситуациях, не обеспечиваются энергией вовсе. Примером тому может послужить снижение функциональной активности органов пищеварительной и половой системы при хронических стрессах, по сути являющихся хроническими гипоэнергетическими состояниями. Выздоровление организма, находящегося в таком энергодефицитном состоянии невозможно, так как необходимые для этого процессы не входят в список первоочередных «потребителей» энергии. Добавим, что и необходимость энергетического обеспечения новых молекулярных процессов, индуцируемых назначением фармакологических лекарственных средств также может частично или полностью блокироваться энергорегулирующими системами, что на клиническом уровне проявляется необходимостью значительного повышения дозы лекарственного вещества, или же отсутствием адекватно значимых ответных реакций организма на проводимую терапию. Единственный путь выведения организма из гипоэнергетического состояния состоит в использовании для этих целей донаторов энергии и в этом плане наиболее подходящим «донором энергии» является энергия НИЛИ (и в меньшей степени – других источников электромагнитных излучений). Правильно спланированная тактика НИЛТ обеспечивает оптимальное количество энергии квантов света, что и создает предпосылки для ликвидации внутриклеточного энергодефицита с последующим восстановлением функциональной и метаболической деятельности биосистемы.

Следующий этап взаимодействия НИЛИ и биосистемы охватывает уже не только молекулярный, но и клеточный уровень, проявляющийся в ускорении распространения ионов кальция в эндоплазматическом матриксе, интенсификации пассивного и активного транспорта ионов натрия и калия через клеточную мембрану, изменении конформационного состояния клеточной и внеклеточной воды и, в конечном итоге – в изменении мембранного потенциала клетки, чутко реагирующего на все внутриклеточные процессы. Изменение мембранного потенциала нескольких клеток приводит к активации рецепторного аппарата чувствительного нервного волокна, контролирующего эту группу клеток. Полученная информация в виде импульса по афферентному звену рефлекторной дуги направляется в центральные отделы вегетативной нервной системы (ВНС), основным «представителем» которой является лимбико-ретикулярный комплекс (ЛРК). Этот уровень реагирования является уже этапом надклеточной реакции биосистемы на воздействие НИЛИ. Для биосистемы переход на этот уровень гомеостаза означает, что последующие процессы, связанные с ее реакцией на фактор НИЛИ будут реализовываться как на клеточном, так и на надклеточном, организменном уровне, с подключением систем органов, управляемых двумя основными инструментами ЛРК: гипоталамо-гипофизарной системой и сегментарным отделом ВНС, представленным симпатической и парасимпатической частью /6/.

Общеизвестные типы реакций и эффектов такие как: противовоспалительный, анальгезирующий, противоотечный, регенераторный, десенсибилизирующий, иммунокорректирующий, гипохолестеринемический и т.д. /7, 8/, являются реакциями тканевого, органного и системного плана, реализация которых происходит с непосредственным участием отделов ВНС. Фактически, сила и направленность реакции биосистемы на воздействие фактора НИЛИ определяется ВНС посредством анализа ряда факторов, основными из которых являются энергетическое состояние клеточных систем, функциональное состояние органов, вовлекаемых в каскад ответных реакций, направленных на поддержание гомеостаза и состоянием самих регулирующих центров ВНС. ВНС регулирует соотношение энергозатратных и энерговосстановительных процессов посредством контроля интенсивности аэробного гликолиза, а по мере истощения запасов глюкозы, стимуляции доступа (посредством выработки соответствующих гормонов) к последующим субстратам окислительного фосфорилирования: жирным кислотам и сукцинату (янтарной кислоте). Кроме того, центральные отделы ВНС осуществляют энергорегулирование косвенным путем, посредством изменения продолжительности периодов активации и торможения биосистемы, а также посредством изменения интенсивности работы органов, принимающих участие в ответных гомеостатических реакциях организма, за счет активации соответствующих эрготропных и трофотропных регуляторных зон ЛРК /2, 6/.

Признание роли центральных отделов ВНС (при контролирующем участии соответствующего участка коры головного мозга) в процессах реагирования организма на лечебно-биологические факторы НИЛТ является вторым ключевым моментом в рассматриваемой нами системе взаимодействия НИЛИ с биологическими объектами.

Собственные исследования позволили определить несколько моделей реагирования биосистемы на воздействие НИЛИ, в реализации которых могут превалировать процессы активации или же, напротив, процессы торможения, контролируемые, соответственно, эрготропной или трофотропной зоной ВНС. Не останавливаясь на характеристике этих моделей реакции биосистемы отметим, что все они объединены необходимостью дозирования энергии НИЛИ в пределах оптимальных для организма значений, определяемых биосистемой на основании ее потенциальных возможностей (заложенных на конституционально-генетическом уровне) и текущего состояния, складывающегося из сиюминутного состояния адаптационных систем организма, адаптационных резервов организма в виде запасов внутриклеточной энергии и субстратов для ее немедленного восстановления и исходного состояния ВНС /9/.

Под оптимумом дозовой нагрузки в данном случае понимается количество энергии, достаточное для выведения клеточных систем организма из энергодефицитного состояния, а с другой стороны, величина энергии не должна достигать фотоповреждающего уровня, способного привести к дисфункциональным нарушениям и к поломке адаптационных механизмов в целом в виде избыточной активации или торможения биосистемы.

Представленная система взаимодействия организма человека с фактором НИЛИ универсальна и рассматривается в качестве основополагающей модели взаимодействия НИЛИ со всеми живыми объектами в пределах их структурной организации. Именно этими аспектами механизмов взаимодействия НИЛИ и организма человека необходимо руководствоваться при создании диагностических систем, направленных на контроль эффективности НИЛТ в процессе выполнения процедур и курсового лечения.

Заметим в связи с этим, что необходимость создания для клинической части лазерной терапии диагностических методик, направленных на оценку эффективности и метрологическое обеспечение НИЛТ не только сохраняется, но и становится все более актуальной в связи с расширением внедрения технологий НИЛТ в клиническую медицину, а также в связи с появлением лазерных приборов, базирующихся на достаточно мощных источниках НИЛИ, обеспечивающих среднюю мощность НИЛИ до 100 мВт. Как нами уже указывалось, фактически непреодолимым препятствием при создании методов контроля воздействия на организм НИЛИ на ранних этапах внедрения технологий НИЛТ явилось отсутствие комплексного системного подхода, опирающегося на четкие представления о механизмах действия НИЛИ на биообъекты с позиций оценки их в качестве сложных динамических систем /10/.

Успешной в этом плане можно считать систему мониторингового контроля реакций организма в процессе лечебных процедур, базирующуюся на аппаратно-программной технологии с использованием фотоплетизмографии (ФПГ), являющейся одним из распространенных методов оптической диагностики – неинвазивной медицинской спектрофотометрии (НМС). Данная система разработана к.ф.-м.н. Р.Д. Аитовым и к.м.н. Е.Л. Малиновским целенаправленно для контроля реакций организма в процессе выполнения НИЛТ на базе аппарата «ТОАРО-ФПГ». В процессе создания данного аппарата и соответствующей методологии, разработанной на основе обширной базы исследований в различных нозологических и возрастных группах детей и взрослых пациентов, использовались методические подходы вышеизложенных механизмов взаимодействия НИЛИ с биологическими системами.

Данный метод основывается на отслеживании влияния ВНС на сердечную деятельность и периферическую гемодинамику на основе оригинальной тест-системы «ТОАРО» (получившей название по аббревиатуре слов Тестовое Определение Адаптационных Резервов Организма). Тест-система «ТОАРО» базируется на ряде количественных показателей, ориентированных на определение характера и особенностей реагирования периферической гемодинамики и сердечной деятельности на воздействие фактора НИЛИ по значениям интегрального параметра, получившего название «ритмоинотропный показатель» (РИП), и визуальным характеристикам пульсовых волн.

Тест-система «ТОАРО» включает следующие признаки:

1. Время появления первичной фотоплетизмографической реакции;
2. Направленность первичной фотоплетизмографической реакции по типу активации (эрготропный вариант вегетативной регуляции) или торможения (трофотропный вариант вегетативной регуляции) биосистемы;
3. Соотношение долевого количества пульсовых волн, реализованных по эрготропному или трофотропному варианту;
4. Среднее значение РИП в целом за исследовательскую сессию;
5. Появление в динамике выполнения процедур атипичных реакций переактивации или устойчивого торможения;

6. Появление в процессе исследования визуальных признаков напряженной работы сердечно-сосудистой системы.

Критерии (1) и (2) несут информацию об исходном состоянии вегетативной нервной системы: ее реактивности и исходной активности эрготропной или трофотропной зоны надсегментарного отдела ВНС. Следующие критерии показывают динамическую реакцию организма на воздействие биофизического фактора НИЛИ. При этом критерии (3), (4) и (5) на количественном уровне, а критерий (6) на качественном, предоставляют возможность выявлять характер реакций организма при воздействии на него лечебно-биологических факторов НИЛИ. Критерий (6) является важным дополнением, показывающим напряженность сердечной деятельности (рисунок 1).

Для большего удобства интерпретации критерия (3) было введено понятие коэффициента вегетативной регуляции (КоВР). КоВР является расчетным и получается при вычитании значения долевого продолжительности периода торможения из значения долевого продолжительности периода активации, полученных во время фотоплетизмографического исследования. Значение КоВР ориентировано на установление результирующего влияния вегетативной нервной системы на адаптационные системы организма, включающие и сердечно-сосудистую систему. Интерпретация КоВР представлена в таблице 1.

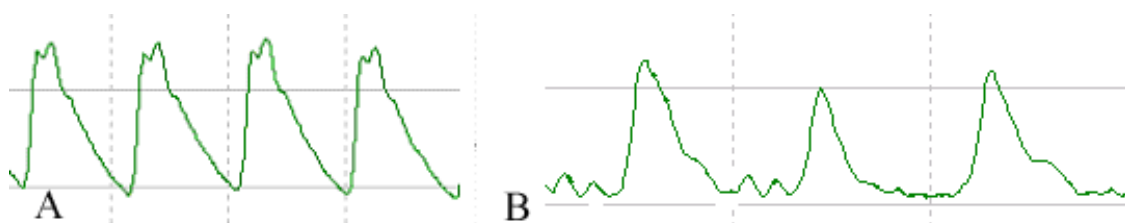


Рисунок 1 – Признаки напряженной работы сердечно-сосудистой системы: в позиции «А» представлен фрагмент фотоплетизмограммы со «ступенькой» на вершине пульсовой волны, в период максимального систолического сокращения; в позиции «В» показаны ступеньки в период диастолического расслабления миокарда

Таблица 1 – Интерпретация значений коэффициента вегетативной регуляции при различных типах адаптационных реакций

Сверхвысокая активация	Зона оптимума	Умеренное торможение	Сверхвысокое торможение
94 – 100	39 – 93	0 – 38	менее 0

Решающим в определении тактики терапии является критерий (4), рассчитываемый программно по сумме мгновенных значений РИП при реализации каждой пульсовой волны (таблица 2).

Таблица 2 – Градации средних значений ритмоинотропного показателя

Состояние адаптационных систем	Диапазон значений	Интерпретация значений, варианты тактики
Фоновое колебание РИП	-4 – 15	Соответствует состоянию относительного покоя гомеостатических систем
Умеренное возмущение био-системы	16 – 30	Наступление фазы эрготропной активности вегетативной нервной системы
Выраженная активация био-системы	31 – 50	Эрготропная активность нервной системы в пределах оптимума. В этом диапазоне значений предпочтительно завершение процедуры при выполнении терапии по вариантам базовому и ПИТ
Ярко выраженная активация биосистемы	51 – 85	

Продолжение таблицы 2		
Сверхактивация биосистемы	86 – 129	Избыточная активность биосистемы, способна привести к развитию отрицательных реакций
Переактивация	более 130	
Слабое торможение биосис-темы	-5 – -15	Наступление трофотропного состояния нервной системы
Умеренное торможение биосистемы	-16 – -30	Обратимое торможение биосистемы. Допустимое значение на ранних этапах курсового лечения
Выраженное торможение биосистемы	-31 – -50	Выраженная трофотропная активность. Допустимо при выполнении процедуры по варианту ПИА
Ярко выраженное торможение биосистемы	-51 – -85	Глубокое торможение биосистемы, способно привести к снижению функциональной активности органов и систем, включая иммунную систему
Сверхторможение	менее -86	

Условные обозначения: ПИТ – перепланировка избыточного торможения, ПИА – перепланировка избыточной активности

Атипичные фотоплетизмографические реакции (критерий (5)) являются отражением адаптационных нарушений в условиях продолжающегося воздействия на организм фактора НИЛИ, проявляющихся в виде «сбоев» в чередовании периодов активации и торможения при нормативной реакции организма при воздействии на него внешних физических факторов. Развитие атипичной реакции переактивации проявляется в виде удлинения периода активации более 30-45 с. Дополнительным критерием в установлении реакции переактивации является устойчивое значение РИП, превышающее 130% (рисунок 2).

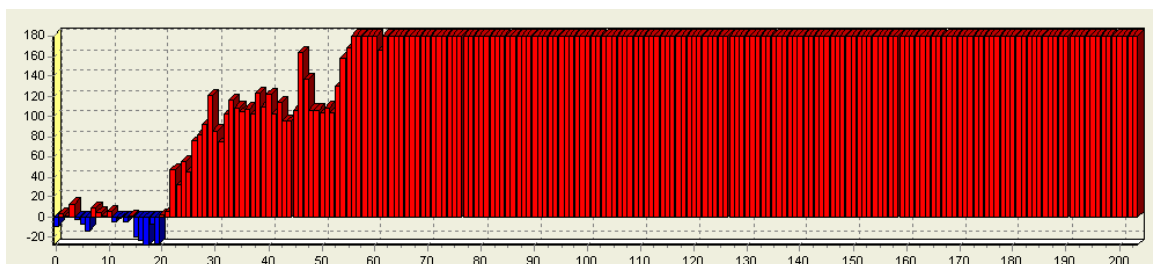


Рисунок 2 – Пример атипичной фотоплетизмографической реакции переактивации

Атипичная фотоплетизмографическая реакция устойчивого торможения проявляется в виде более чем 15 с промежутка времени, устанавливаемого по отрицательным значениям РИП (рисунок 3).

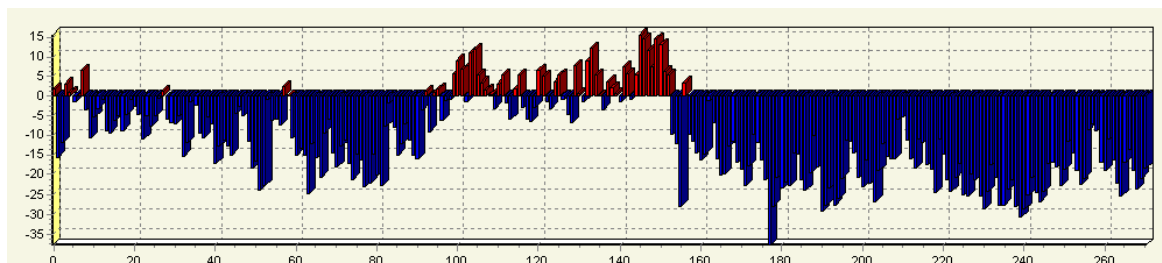


Рисунок 3 – Пример атипичной фотоплетизмографической реакции избыточного торможения биосистемы

Результаты внедрения этой технологии на научно-методологическом уровне позволили не только подтвердить безусловность вовлечения ВНС в гомеостатические реакции в качестве одного из ключевых механизмов, но и определить закономерности реагирования организма на

воздействие фактора НИЛИ в виде нескольких моделей реагирования биосистемы и разработать для каждой из них определенную тактику терапии /6, 9, 11/.

В практическом плане внедрение аппарата «ТОАРО-ФПГ» и соответствующей методики в клиническую лазерологию предоставляет возможности определения оптимальной дозовой нагрузки, исключающей фотоиндуцированные отрицательные реакции, возникающие при передозировках НИЛИ, а также случаи отсутствия положительной динамики при проведении курсовой НИЛТ больных различных нозологических и возрастных групп. В этом аспекте представляет интерес изучение доли отрицательных реакций при сравнении результатов лечения, проведенной в различных нозологических группах больных детей и взрослых пациентов по стандартной и оригинальной методикам НИЛТ (рисунок 4).

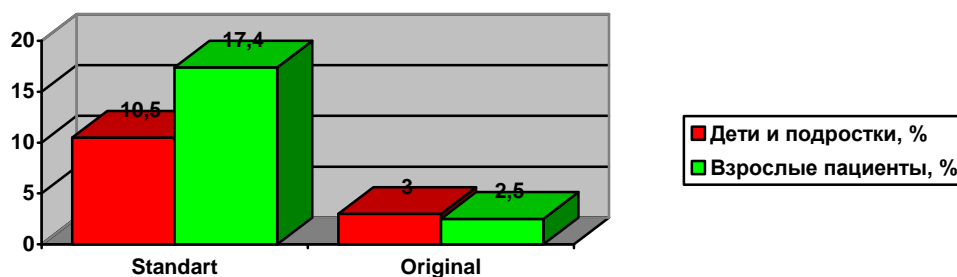
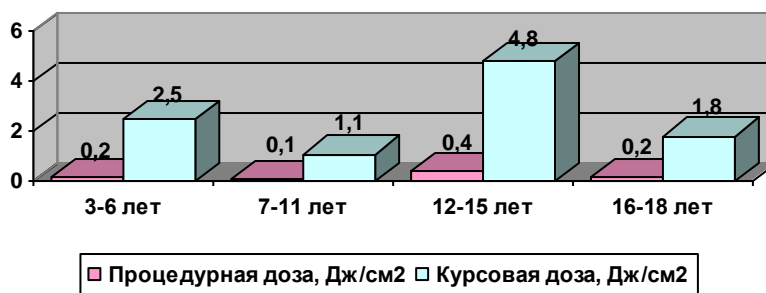
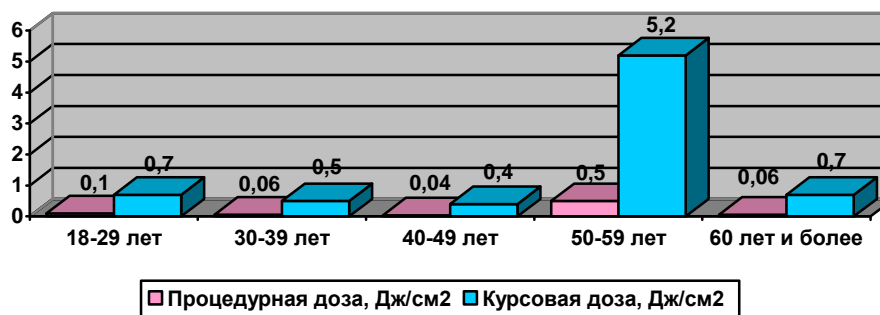


Рисунок 4 – Долевое распределение отрицательных реакций при проведении курсовой НИЛТ по стандартной и новой технологии:
Standart – НИЛТ по стандартным методикам, Original – НИЛТ по новой технологии с мониторным фотоплетизмографическим сопровождением

На основе новых, индивидуализированных подходов в выборе режимов НИЛИ пересмотрены значения дозовых нагрузок в различных возрастных группах при проведении лечения с использованием лазеров различного спектрального диапазона (рисунок 5), разработаны новые методологические подходы при лечении артериальной гипертензии и синдрома хронической усталости /12/.



а)



б)

Рисунок 5 – Средние значения процедурной и курсовой дозы:
а – у детей и подростков; б – у взрослых пациентов

Новая технология лазерной терапии, получившая название «индивидуально дозированной лазерной терапии» (ИДЛТ), может открыть перспективы в сокращении списка противопоказаний, за счет выведения некоторых нозологий в список разрешенных для проведения НИЛТ. К таким заболеваниям можно отнести тиреотоксикоз и заболевания органов и систем органов (дыхательной, сердечно-сосудистой, мочевыделительной, гепатобилиарной системы), находящихся в стадии функциональной декомпенсации.

Также немаловажно в научно-методологическом плане появление возможностей типирования больных с различными типами реакций организма при воздействии на него лечебно-биологических факторов НИЛТ на основе хорошо известных критериев, привлечение которых ранее, до внедрения в практику лазерной терапии представленной ФПГ технологии, было невозможно по причине отсутствия информации о характере и особенностях гомеостатических реакций организма в динамике воздействия на него факторов НИЛИ. Выполнение НИЛТ по индивидуализированным для каждого пациента режимам НИЛИ, ориентированным на особенности реакций организма на системном гемодинамическом и в целом организменном уровне нивелирует недостатки стандартных подходов при проведении НИЛТ – и в этом плане необходимо признать очевидность того факта, что при стандартной «лазерной терапии» происходит только лишь «лазерное воздействие» на патологически модифицированные органы без учета особенностей динамической реакции организма как целостной системы; при выполнении же лазерной терапии по методикам ИДЛТ, обеспеченной ФПГ контролем динамических реакций организма, становится возможным лечение организма в целом в соответствии с принципами, провозглашенными еще Гиппократом «лечить не только болезнь, но также и больного».

При столь больших перспективах и возможностях лазерной терапии, выполняемой по методикам ИДЛТ признать новую технологию «золотым стандартом» в приборной и методологической части НИЛТ пока невозможно, так как, по нашему мнению, более полноценно выглядит вариант комбинирования «ТОАРО-ФПГ» (или его аналогов) с методами определения состояния биологических тканей в зоне прямого лазерного облучения. Комбинация этих методик в пределах одного приборного лечебно-диагностического комплекса предоставит возможности коррелировать световую нагрузку на биологические ткани (в зоне прямого лазерного облучения) и состояние адаптационных систем организма в динамике процедуры НИЛТ.

Методики, способные решить задачи, связанные с дозиметрическим контролем состояния биологических тканей в зоне прямого лазерного облучения, уже существуют в качестве самостоятельных аппаратно-программных методов. И в этом аспекте большой интерес представляют методы контроля тканевых реакций в зоне прямого лазерного облучения с учетом оптических /13/ и теплофизических /14/ параметров биологических тканей.

Среди существующих методов тканевой диагностики большой интерес вызывают методы, основанные на НМС – пульсоксиметрия (SaO_2), оптическая тканевая оксиметрия (SO_2), лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ), лазерная флюоресцентная диагностика (ЛФД) и др. На современном этапе развития науки и техники, с привлечением для решения технических задач цифровых технологий, использование для диагностических целей приборов НМС позволяет достоверно регистрировать изменения микроциркуляции и оксигенации крови, что в свою очередь является одним из ключевых моментов при взаимодействии НИЛИ с биотканями /15/.

В числе существующих приборных и методологических решений НМС наиболее привлекательной для реализации поставленной задачи контроля состояния биологических тканей в зоне прямого лазерного облучения нами рассматривается оптическая тканевая оксиметрия (например, /16/), позволяющая неинвазивно (*in vivo*, транскутанно) отслеживать не только процессы микрогемодинамики, но и процессы транспорта и утилизации кислорода в системе микроциркуляции, что является принципиальным для выработки критериев тканевой биоэффективности НИЛТ при ее проведении в режиме реального времени. Методика диагностики, реализованная на базе прибора «Спектротест», ориентирована на определение среднего уровня объемного капиллярного кровенаполнения ($V_{\text{кр}}$) поверхностных слоев мягких биологических тканей (кожа, слизистые оболочки органов), среднего уровня оксигенации (сатурации) смешанной крови микроциркуляторного русла

(SO₂) обследуемой биоткани и среднего уровня её меланиновой пигментации (Me). Добавим, что отображение всей получаемой медико-биологической информации производится в режиме реального времени на экране монитора ПЭВМ.

Технологические решения, реализованные при создании прибора и метода оптической тканевой оксиметрии с привлечением для получения биоинформационных сигналов импульсных лазерных источников ближнего инфракрасного диапазона, обусловлены получением ряда преимуществ, как в конструктивном, так и в методологическом плане.

Во-первых, стремлением обеспечить достаточный диагностический объём биоткани (рисунок 6), необходимый для стабильной регистрации воздействия НИЛИ.

Во-вторых, возможностью расположения компактной оптической системы излучателей и фотоприёмника на теле пациента в лёгком контакте с облучаемой биотканью. Конструктивно возможно располагать измерительную систему как снаружи облучающего терминала лазерного терапевтического аппарата (АЛТ), так и внутри него (рисунок 7), что дает дополнительные возможности при исследованиях механизмов НИЛИ на локальном уровне.

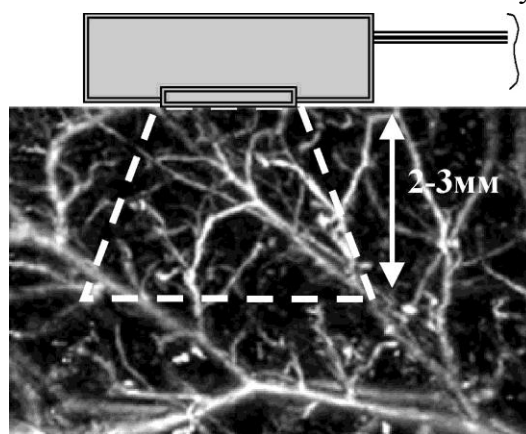
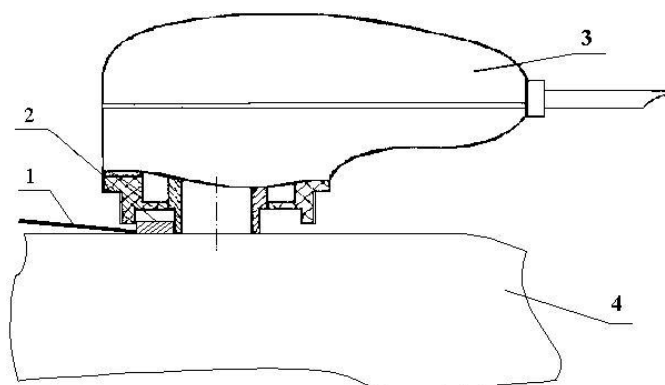


Рисунок 6 – Сплетение микрососудистого русла и диагностический объём в оптической тканевой оксиметрии /16/



**Рисунок 7 – Один из вариантов расположения оптической диагностической системы и облучающего терминала АЛТ на теле пациента:
1 – кабель оптической системы; 2 – оптическая система;
3 – облучающий терминал АЛТ; 4 – биоткань**

В-третьих, это высокая чувствительность метода, что объективно показывают различные функциональные (нагрузочные) тесты и пробы – дыхательная, тепловая, холодовая, окклюзионная и др. /16/.

Рассмотренные методологические и аппаратные аспекты, позволяют сделать вывод о возможном использовании тканевой оксиметрии для оценки эффективности назначаемых пациенту тех или иных лечебных мероприятий и отдельных лечебных процедур, например НИЛТ, в зависимости от индивидуального типа микроциркуляции крови. Однако следует учесть влияние на микроциркуляторное русло обычного теплового эффекта при воздействии на биоткани НИЛИ, что является предметом дальнейших отдельных исследований.

В заключение отметим, что создание лечебно-диагностического аппаратно-программного лазерного комплекса на платформе двух приборно-методологических технологий, направленных на отслеживание характера тканевых локальных и системных гемодинамических реакций организма, способствует появлению новых научно-методических подходов, устраняющих эмпиризм при планировании режимов НИЛИ и лечебной тактики НИЛТ в целом при проведении процедурного и курсового лечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дунаев, А.В. Лазерные терапевтические устройства [Текст] / А.В. Дунаев, А.Р. Евстигнеев, Е.В. Шалобаев / Под ред. К.В. Подмастерьева: Учебное пособие. – Орел: ОрелГТУ, 2005. – 143 с.
2. Малиновский, Е.Л. Возможности прогнозирования индивидуальной реакции больных на курсовую низкоинтенсивную лазерную терапию [Текст] / Е.Л. Малиновский, А.В. Картелишев, А.Р. Евстигнеев. // Современные возможности лазерной медицины и биологии, под ред. проф. А.В. Картелишева, проф. А.Р. Евстигнеева, д.м.н. В.Н. Уральского. – В. Новгород-Калуга: АКФ Политоп, 2006. – С. 146-161.
3. Капустина, Г. М. Клинико-патохимическое обоснование феномена обострения у больных ишемической болезнью сердца при лечении гелий-неоновым лазером [Текст] / Г. М. Капустина, Г.Ф. Бабушкина // Кардиология. – Т. 28, №8. – 1988. – С. 72-75.
4. Костров, В.А. Внутривенное облучение крови у больных с гипертонической болезнью: Автореф. дисс. канд. мед. наук. – Н. Новгород, 1994. – 22 с.
5. Грунина, Е.А. Противопоказания для применения внутрисосудистой лазерной терапии при ревматоидном артрите [Текст] / Е.А. Грунина, К.В. Зверева, Н.Д. Гладкова. // Лазерная и магнитная терапия в экспериментальных и клинических исследованиях. – Материалы научной конференции. – Обнинск: МРНЦ РАМН, 1993. – Ч. I – С. 131-132.
6. Малиновский, Е.Л. Маркеры прогноза индивидуального прогнозирования реагирования детей и подростков на курсовую лазерную терапию для оптимизации ее режимов: Дис... канд. мед. наук. – М., 2007. – 216 с.
7. Илларионов, В.Е. Основы лазерной терапии / В.Е. Илларионов. – М.: Респект, 1992. – 126 с.
8. Козлов, В.И. Лазеротерапия / В.И. Козлов, Буйлин В.А. – М.: Астр, 1993. – 56 с.
9. Картелишев, А.В. Повышение эффективности лазерной терапии с использованием методики пальцевой фотоплетизмографии / А.В. Картелишев, Е.Л. Малиновский, В.И. Елисеев, А.Г. Румянцев: Пособие для врачей. – М.: ГНЦ ЛМ, 2007. – 46 с.
10. Dunaev A.V., Gasparyan L.V. The use of biological feedbacks and methods of testing for light therapy // Abstract book of 13th International Congress of European Medical Laser Association «Laser Helsinki 2008» - Helsinki: EMLA, 2008.
11. Малиновский, Е.Л. Повышение эффективности лазерной терапии с использованием фотоплетизмографических технологий / Е.Л. Малиновский, А.В. Картелишев, А.Р. Евстигнеев // Актуальные вопросы реабилитации в XXI веке (медицинские, социальные, психолого-педагогические и организационные). – Материалы научно-практической конференции, под. ред. Н.Е. Мажара, Т.В. Косенковой. – Смоленск, 2008. – С. 93-95.
12. Малиновский, Е.Л., Лечение синдрома хронической усталости с применением индивидуально дозированной низкоинтенсивной лазерной терапии / Е.Л. Малиновский, А.В. Картелишев, А.Р. Евстигнеев // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии. – Материалы 8-й международной научно-технической конференции, под ред. А.К. Бернюкова, А.Г. Самойлова, Л.Т. Сушкова. – Владимир, 2008. – С. 107-111.
13. Александров, М.Т. Методы клинической биофотометрии [Текст] / М.Т. Александров, В.Ф. Барыбин, Д.А. Рогаткин, А.Р. Евстигнеев. // Применение низкоинтенсивных лазеров в клинической практике, под. ред. чл.-корр. РАМН О.К. Скобелкина. – М.: Полиграф-информ, 1997. – С. 265-274.
14. Dunaev A.V. Method and device used for testing of the absorbed dose of radiation during low level laser therapy, Proc. SPIE, vol. 6440 (64400T), 2007.
15. Рогаткин, Д.А. Низкоинтенсивная лазерная терапия. Взгляд физика на механизмы действия и опыт применения [Текст] / Д.А. Рогаткин, В.В. Черный. // Взаимодействие излучения с веществом. – Материалы 2-й Байкальской школы по фундаментальной физике. – Иркутск: ИГУ, 1999. – С. 366-378.
16. Афанасьев, А.И. Методики и аппаратура неинвазивной оптической тканевой оксиметрии [Текст] / А.И. Афанасьев, Д.А. Рогаткин, А.А. Сергиенко, В.И. Шумский. // Голография: Фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии. – Материалы XXVI школы по когерентной оптике и голографии, под. ред. проф. А.Н. Малова. – Иркутск: Папирус, 2008. – С. 505-513.

Малиновский Евгений Леонидович

ООО «Центр реабилитации», г. Обнинск
Кандидат медицинских наук
Тел. (48439) 4-45-50
E-mail: melich@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», доцент
Тел. (4862) 41-98-76
E-mail: dunaev@ostu.ru

Е.В. ПАХОЛКИН

ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ «ТРЕТЬЕГО ТЕЛА»

В работе приведен краткий анализ современных отечественных и зарубежных концепций «третьего тела» в трибологии. Свойства «третьего тела» рассмотрены с точки зрения их проявлений в виде процессов и явлений электрической природы. Отмечена связь основных свойств с диагностическими признаками и параметрами электрической природы. Констатируется эффективность электрических методов трибодиагностики при решении задач, связанных с оценкой свойств «третьего тела» в различных его проявлениях.

Ключевые слова: трибодиагностика, «третье тело», диагностические параметры, электрический контроль.

The paper provides a concise analysis of contemporary domestic and foreign concepts «third body» in tribology. Properties «third body» discussed in terms of their manifestations in the form of processes and phenomena of electrical nature. The link with the basic properties of diagnostic features and parameters of electrical nature. Concludes the efficiency of electrical methods of tribodiagnosics when dealing with the assessment of the properties of «third body» in its various manifestations.

Key words: tribodiagnosics, «third body», diagnostic parameters, the electric control.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проблема оценки состояния «третьего тела» (ТТ) лежит на стыке разделов знаний: машиноведение (трибология и трибодиагностика); трение, износ, смазка; неразрушающий контроль; электрические измерения в физическом эксперименте; химия; химмотология и др. Актуальность фундаментальных исследований по данной проблеме связана с тем, что ни одна из перечисленных областей не располагает теорией, комплексно описывающей процессы, происходящие в зоне трения. В свете тенденций в разработке смазочных композиций мало пригодными становятся многие теоретические положения, основанные на классических представлениях о трибосопряжении, когда смазочный материал представлялся структурой с элементарным математическим описанием, а трущиеся поверхности – однородными твердыми телами. Этим определяются ограниченная достоверность моделей фрикционного контакта, существенные расхождения результатов теории и эксперимента, слабое внедрение результатов фундаментальных исследований в прикладные области, огромное число не решаемых задач по оценке надежности, долговечности и остаточного или потенциального ресурса трибосистем.

В настоящее время общепризнанным является применение электрических методов в трибологии, неразрушающем контроле и испытаниях трибосопряжений. Применение активных и пассивных электрических параметров позволяет решать задачи оценки характеристик фрикционного взаимодействия: изнашивания, качества поверхностей, площади касания элементов пар трения, состояния смазки и много другое. Применение теоретических положений электрического неразрушающего контроля трибосопряжений при исследовании свойств собственно ТТ связано с установлением сущности физических и химических процессов в зоне фрикционного контакта, с выбором эффективных диагностических параметров. На начальном этапе решения задачи в такой постановке необходимо синтезировать структурно-логическую схему, описывающую совокупность процессов в зоне трения в виде явлений электрической природы.

ОБОБЩЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О КОНЦЕПЦИЯХ ТТ

ТТ – рабочий слой, создающийся в зоне фрикционного взаимодействия контактирующих тел, в котором расположены фрикционные связи, а также заполняющие

пространство между ними смазочный материал и продукты износа. Зона фрикционного взаимодействия по И.В. Крагельскому и А.В. Чичинадзе рассматривается как «некое физическое тело», имеющее малую толщину и обладающее особыми свойствами, отличными от свойств исходных тел. ТТ, исходя из данного определения, можно рассматривать нескольких концепциях.

ТТ как среда, свойства которой определяются свойствами смазочного материала. Собственно смазочный материал, в т.ч., масло в условиях фрикционного взаимодействия, особенно при эластогидродинамической смазке, приобретает свойства, отличные от свойств исходного смазочного материала. При высоких давлениях масло перестает быть жидкой средой. Трущиеся тела разделяет тонкий слой (десятые доли мкм и менее), качество функционирования которого определяется характеристиками смазочного материала, а именно, вязкостными, вязкостно-температурными и несущей способностью. Последняя характеристика, относящаяся к группе смазывающих свойств, очевидно, является интегральной и в значительной степени определяется реологическими характеристиками смазочного материала, т.е. вязкостными и вязкостно-температурными свойствами.

ТТ как тонкий поверхностный слой, свойства которого отличны от свойств смазочного материала. В условиях граничной смазки предотвращение изнашивания металлических поверхностей достигается за счет формирования на них моно- и полимолекулярных адсорбированных слоев. Свойства данных слоев косвенно определяются составом смазочного материала. Определяющим свойством смазочного материала в данном случае является смазывающая способность (липкость, маслянистость). В терминологии межмолекулярных взаимодействий на границе раздела фаз данное свойство проявляется в адгезионной и когезионной способности смазочной среды, которая обычно содержит различные поверхностно активные вещества (ПАВ).

Постулируемые свойства смазочного материала при граничной смазке: смазочный материал – коллоидный раствор поверхностно- и химически активных компонентов. Определяющими характеристиками смазочного материала, отражающими качество функционирования ТТ, являются поверхностная активность различной природы (физическая и химическая адсорбция).

ТТ как поверхностный твердый защитный слой. Введение соединений металлов с серой, фосфором (наиболее распространенный вариант – дисульфид молибдена) приводит к модифицированию рабочих поверхностей: формируются поверхностные слои, обеспечивающие снижение трения, предотвращение адгезионных связей между рабочими поверхностями. При переходе к граничной смазке сформированные слои, представляющие ТТ, играют определяющую роль в предотвращении изнашивания.

В рамки данной концепции следует отнести явления, связанные с формированием сервовитных слоев (Д.Н. Гаркунов).

Качество защитного слоя также косвенно определяется составом смазочного материала и связано с его противоизносными, противозадирными и антифрикционными свойствами.

ТТ как среда смазочного материала, модифицированного частицами твердых фракций. Искусственное формирование ТТ достигается введением ультрадисперсных твердых фракций (от графита до алмаза), что изменяет условия трения, предотвращая адгезионное изнашивание рабочих поверхностей трибосопряжения. Естественное модифицирование смазочной среды связано с накоплением в смазочном материале частиц продуктов изнашивания и сажи.

В целом, действие рассматриваемого ТТ носит сложный комплексный характер. К основным явлениям следует отнести следующее:

- изменение вязкости базовой основы (смазочного материала);
- изменение условий контактирования рабочих поверхностей, заключающееся в том, что искусственно введенные частицы в смазочном материале играют роль тел качения (M. Godet, D. Dowson) и пр.;

– проявление диспергирующих свойств смазочного материала: введение диспергирующей присадки обеспечивает «захват» активными молекулами частиц изнашивания и сажи, при этом предотвращается слипание частиц и их адгезия на рабочих поверхностях.

ТТ как среда, сформированная продуктами изнашивания и загрязнениями.

Продукты изнашивания и загрязнения, в виде слоя на рабочих поверхностях также рассматривают как ТТ. В данном случае с позиции функционального назначения смазочных материалов понятие «качество функционирования ТТ» не имеет смысла. Формирование такого ТТ, связанное с процессами деструкции смазочного материала и с его механическим загрязнением, способствует ухудшению условий фрикционного взаимодействия (в большинстве случаев).

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СОВОКУПНОСТИ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА В КОНЦЕПЦИИ ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ В ВИДЕ ЯВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Все свойства ТТ напрямую или косвенно связаны со свойствами смазочного материала. Анализ совокупности таких свойств показывает, что с точки зрения процессов и явлений, отвечающих за формирование, функционирование и деструкцию ТТ, достаточно рассмотреть ограниченный перечень свойств, которые могут рассматриваться как характеристики, пригодные в качестве диагностических признаков и параметров. К таким свойствам следует отнести:

- вязкостные и вязкостно-температурные;
- смазывающие;
- детергентно-диспергирующие.

Большая часть опущенных из рассмотрения характеристик непригодна для использования в качестве диагностических признаков, а некоторые из опущенных из рассмотрения свойств косвенно связаны с уже выделенными (например, химические и физико-химические). Дальнейший анализ принятых к рассмотрению свойств смазочных материалов показывает, что данный список свойств также подлежит дальнейшему сокращению с целью формирования перечня диагностических признаков.

Например, несущая способность (характеристика, относящаяся к смазывающим свойствам), с точки зрения эксплуатационных свойств, является самостоятельным показателем качества. Однако, с позиции проявления несущей способности, эта характеристика тождественна реологическим показателям, т.е. вязкости, вязкостно-температурным свойствам и зависимости вязкости от давления.

Выполненный анализ механизмов проявления смазывающей способности и моющих свойств также позволяет констатировать общность физических и химических явлений, обеспечивающих указанные свойства. В частности, противодействие изнашиванию в условиях граничной смазки обеспечивается адгезионной способностью смазочной среды. При этом диспергирующая способность смазочной среды проявляется аналогичным образом: «захват» частицы изнашивания и предотвращение слипания частиц в более крупные фракции становится возможным при наличии в смазочной среде поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые адсорбируются на частице. Таким образом, можно перейти от рассмотрения по отдельности смазывающей способности и моющих свойств к общей характеристике – адсорбционной и когезионной способности.

Наконец, необходимо указать на общность процессов, определяющих противоизносные, противозадирные и антифрикционные свойства. Эти процессы связаны с действием ПАВ, а также с формированием твердых защитных покрытий на рабочих поверхностях.

Приведенный анализ связи свойств смазочных материалов со свойствами ТТ позволяет выделить следующие процессы, подлежащие дальнейшему исследованию с позиции их проявления в виде явлений электрической природы:

- формирование реологических характеристик смазочного материала с учетом его вязкости, вязкостно-температурной характеристики и зависимости вязкости от давления;
- адсорбция и когезия смазочной среды на рабочих поверхностях и на частицах изнашивания (загрязнений);
- модифицирование микрогеометрии рабочих поверхностей защитными твердыми слоями.

Структурно-логическое описание совокупности процессов в зоне трения фрикционного контакта в концепции их проявления в виде явлений электрической природы представлено рисунками 1 и 2. На рисунке 1 показано, что основные процессы, отвечающие за формирование ТТ, с одной стороны, определяют перечисленные ранее основные свойства смазочных материалов, а с другой стороны, связаны с процессами и явлениями, которые имеют электрическую природу.

Рисунок 2, логически связанный с рисунком 1, раскрывает дальнейшую связь свойств смазочных материалов и ТТ с параметрами и характеристиками, выступающими в качестве диагностических при реализации электрических методов неразрушающего контроля и диагностирования трибосопряжений. При этом представлена краткая характеристика научных направлений, в теории которых используются рассмотренные диагностические параметры.

ВЫВОДЫ

1 Свойства смазочных материалов в значительной мере определяют условия формирования и функционирования ТТ, что, в свою очередь, проявляется в процессах и явлениях, которые прямо или косвенно можно связать с явлениями электрической природы.

2 Рассмотрение процессов и явлений в трибосопряжении в изложенном аспекте позволяет в конечном итоге связать характеристики ТТ с диагностическими параметрами электрической природы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
2. Исследование механизма образования частиц третьего тела в линейном лентопротяжном устройстве. Study of generation mechanism of three-body particles in linear tape recording / Shi Baogui, J. L. Sullivan, M. A. Wild, S. O. Saied // Trans. ASME. J. Tribol. - 2005. 127. - № 1. – С. 155-163. Англ.
3. Влияние третьего тела в тепловых задачах контактов с трением: приложение к тормозным механизмам. Third body influence on thermal friction contact problems: application to braking / Majcherczak Didier, Dufrenoy Philippe, Nait-Abdelaziz Moussa // Trans. ASME. J. Tribol. - 2005. 127. - № 1. – С. 89-95. Англ.
4. Анализ твердого третьего тела при помощи дискретного подхода: влияние адгезии и размера частиц на макроскопические свойства. Solid third body analysis using a discrete approach: influence of adhesion and particle size on macroscopic properties / I. Iordanoff, B. Seve, Y. Berthier // Trans. ASME. J. Tribol. - 2002. 124. - № 3. – С. 530-538. Библ. 22. Англ.
5. Математические модели тонкого промежуточного слоя между контактирующими телами. Mathematical models of thin interlayer between contacting solids / C. Kouyumdjiev, I. Ivanov, A. Baltov // J. Theor. and Appl. Mech. (Bulgaria). - 2001. 31. - № 2. - С. 78-86. Библ. 10. Англ.
6. Трибоэлектричество и механизм трения / Н. М. Мамаев, М. Н. Мамаев // Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике: Материалы международной научно-практической конференции, Новочеркасск: Изд-во НПО «ТЕМП». – 2002. – С. 52-55.
7. Обзор современных подходов к моделированию твердых третьих тел. A review of recent approaches for modeling solid third bodies / I. Iordanoff, Y. Herthier, S. Descartes, H. Heshmat // Trans. ASME. J. Tribol. - 2002. 124. - №4. – С. 725 – 735. Англ.
8. Влияние третьего тела и потоков материалов в трибокоррозионных системах, включающих контакт скольжения. Third body effects and material fluxes in tribocorrosion systems involving a sliding contact / D. Landolt, S. Mischler, M. Stemp, S. Barril // Wear. - 2004. 256. - № 5. - С. 517-524. Англ.

Работа выполняется в рамках проекта 2075 аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)»

Пахолкин Евгений Васильевич

к.т.н., доцент, доцент кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация",
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, т
ел. (4862) 419876,
E-mail: Eugene_P@bk.ru



Рисунок 1 – Связь свойств смазочных материалов и ТТ с процессами и явлениями в трибосопряжении



Рисунок 2 – Основы для моделирования процессов в зоне трения при исследовании явлений электрической природы

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) выравнивают по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

Рисунок 1 – Текст подписи

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.ostu.ru.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Адрес редакции:

Орловский государственный технический университет
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24, 41-98-21
www.ostu.ru
E-mail: nmu@ostu.ru

Технический редактор О.Ю. Григорьева
Компьютерная верстка О.Ю. Григорьева

Сдано в набор 06.07.2009 г.
Подписано в печать 11.08.2009 г.
Формат 60x88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 7,7.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.