

<p>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. Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф. Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф. Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф. Константинов И.С. д-р техн. наук, проф. Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф. Попова Л.В. д-р экон. наук, проф. Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.</p>	<h2>Содержание</h2> <h3>Механика</h3> <p><i>Манжосов В.К., Новикова И.А.</i> Преобразование продольной волны деформации с убывающей интенсивностью на границе сопряжения стержней с упругой прокладкой..... 3 <i>Корнеева Е.Н., Гордон В.А., Корнеев Ю.С.</i> Теория квадратичного приближения при решении задачи профилирования регулирующего диска..... 11 <i>Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л., Соколов С.А.</i> Решение задачи бифуркации цилиндрической оболочки с учетом сложного характера деформирования в момент потери устойчивости при сложном докритическом нагружении..... 16 <i>Поландов Ю.Х., Бабанков В.А.</i> Особенности истечения жидкости из закрытой емкости в случае ее повреждения..... 21 <i>Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С.</i> Метод расчета энергии адгезии упругих тел..... 25</p>
<p>Главный редактор Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации</p>	<h3>Машиностроение и металлообработка</h3>
<p>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.</p>	<p><i>Амбросимов С.К., Большаков А.Н.</i> Повышение производительности фрез за счёт нелинейного обката в процессе резания..... 34 <i>Злобин С.Н.</i> Теоретические исследования процессов в кривошипном прессе с гидродемпфером при разделительных операциях..... 40 <i>Исаев А.Н., Земляной С.А.</i> Исследования структуры материала сварных труб, обработанных дорнованием..... 45 <i>Козлов А.М., Болгов Д.В.</i> Моделирование совмещенной абразивной обработки..... 50 <i>Маркин Н.И., Крайцова Э.А., Москвитин С.А., Капырин К.И., Фёдоров Т.В.</i> Моделирование отрезки точных коротких заготовок в среде deform-3d..... 54 <i>Протасьев В.Б., Истоцкий В.В., Талдыкин А.Н.</i> Обработка фрезерованием декоративных винтовых поверхностей..... 59 <i>Хромов В.Н., Корнеев В.Н., Родичев А.Ю.</i> Технология подготовки поверхности изделия под напыление..... 63 <i>Цыновкин А.С., Дубров Д.Ю., Дубров Ю.С.</i> К вопросу о повышении износостойкости сборных резовупругих увеличителя градиента температур..... 66 <i>Шшикарев М.П.</i> Повышение надежности работы адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения..... 73</p>
<p>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. Зубчанинов В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф. Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф. Колесников К.С. д-р техн. наук, проф., академик РАН Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф. Корндорф С.Ф. д-р техн. наук, проф. Малинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф. 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.</p>	<h3>Приборостроение и системы управления</h3>
<p>Ответственный за выпуск: Григорьева О.Ю.</p>	<p><i>Давыдова Н.В., Корндорф С.Ф., Ногачёва Т.И.</i> Определение параметров емкостной ячейки методом вольтметра-амперметра..... 78 <i>Гарипов В.К., Яцук А.Е.</i> Автоматизированная система регенерации воздушной среды герметично изолированных объектов..... 82 <i>Габдулгазиев С.Р.</i> Метод быстрой оценки источников Гаусса-Маркова на основе векторного квантования..... 88 <i>Селифонов В.С., Прудников С.А.</i> Устройство для исследования силовых характеристик при механической обработке резиноканевых конвейерных лент..... 93 <i>Афанасьев А.А., Трубицын В.Г.</i> Выделение сегментов квазистационарности при анализе речевого сигнала в вокодерах с линейным предсказанием..... 97 <i>Демина Ю.А.</i> Математическая модель тепловых и аэродинамических процессов воздушного термостата с модулями Пельтье..... 104</p>
<p>Адрес редколлегии: 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</p>	<h3>Испытания, контроль, диагностика, мониторинг</h3>
<p>Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство: ПИ № ФС77-35719 от 24 марта 2009 года</p>	<p><i>Яковенко М.В., Подмастерьев К.В.</i> Метод и средство экспресс-контроля ударного объема, совместимые с электрофизиотерапией..... 108 <i>Пахолкин Е.В., Фокин Н.Н.</i> Анализ достоверности метода контроля вязкостно-температурных свойств моторных масел электропараметрическим методом..... 116 <i>Сычев С.Н., Гаврилина В.А., Сычева Е.С.</i> Особенности применения микроколоночного жидкостного хроматографа «Милихром-6»..... 120</p>
<p>Подписной индекс 29504 по объединенному каталогу «Пресса России»</p>	
<p>© ОрелГТУ, 2010</p>	



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

№ 2 (280) 2010

March – April

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

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

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.*

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

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

Podmasteriev 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.*

Smolenzev 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 Federal Department for Mass Communication. The certificate of registration ПИ № ФС77-35719 from 24.03.2009

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

© OSTU, 2010

Contents

Mechanics

<i>Manzhosov V.K., Novikova I.A.</i> Transformation of longitudinal deformation wave with decreasing intensity at the boundary of conjugation of bars with an elastic gasket.....	3
<i>Korneeva E.N., Gordon V.A., Korneev Yu.S.</i> Theory of quadratic approximation with solution of the problem of shaping the regulated disk.....	11
<i>Zubchaninov V. G., Okhlopov N.L., Sokolov S.A.</i> Problem solving bifurcation cylindrical shell with stockaig complex disposition waping in moment loss of stability by complex subcritical weighting.....	16
<i>Polandov Yu.Kh. Babankov V.A.</i> Peculiarities of liquid outflow from a closed damaged capacity...	21
<i>Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S.</i> Method calculation energy of elastic bodies.....	25

Engineering and metalworking

<i>Ambrosimov S.K., Bol'chakov A.N.</i> Increase of productivity of mills due to nonlinear spinning during cutting.....	34
<i>Zlobin S.N.</i> Theoretical researches of processes in the crank press with hydrodamper in the cutting operations.....	40
<i>Isayev A.N., Zemlyanoy S.A.</i> Researches of structure materiala of welded pipes, processed bur-nishing.....	45
<i>Kozlov A.M., Bolgov D.V.</i> Modelling of fetch abrasive filtering.....	50
<i>Markin N.I., Kravtsova E.A., Moskvitin S.A., Kapyrin K.I., Fedorov T.V.</i> The modelling cutting of exact short preparations in the environment of deform-3d.....	54
<i>Protas'ev W.B., Istotkiy W.W., Taldykin A.N.</i> Processing by milling of decorative screw surfaces	59
<i>Chromov V.N., Korenev V.N., Rodichev A.U.</i> Technology of preparation of a product surface for spraying.....	63
<i>Tsinovkin A.S., Dubrov D.Y., Dubrov Y.S.</i> On the issue of the collapsible cutting tool wear resistance increasing method by the temperature gradient rise.....	66
<i>Shishkarev M.P.</i> Increase of reliability of work adaptive frictional clutch 1-st generations.....	73

Instrument Engineering

<i>Davidova N.V., Korndorf S.F., Nogachova T.I.</i> Determination of parameters of capacity cell by method of Voltmeter-Ammeter.....	78
<i>Garipov V. K., Yatsuk A.E.</i> Computer-based system regeneration air leakproof isolate object.....	82
<i>Gabdulgaziyev S.R.</i> Method of the fast estimation of gauss - markovs sources on the basis of vector quantization.....	88
<i>Selifonov V.S., Prudnikov S.A.</i> The device for research of power characteristics at machining rubber-fabric conveyor tapes.....	93
<i>Afanasjev A.A., Trubitsin V.G.</i> Allocation of nearby stationarity segments at the analysis of the speech signal in вокодеpax with the linear prediction.....	97
<i>Demina YU.A.</i> Mathematical model of thermal and aerodynamic processes of the air thermostat with modules pelte.....	104

Tests, control, diagnostics, monitoring

<i>Podmasteriev K. V., Yakovenko M. V.</i> Rapid method and device for stroke volume control, compatible with electrophysiotherapy.....	108
<i>Pakholkina E.V., Fokin N.N.</i> The analysis of reliability of the quality monitoring of viscosity-temperature properties of engine oils by electroparametrical method.....	116
<i>Sychev S.N., Gavrilina V.A., Sycheva H.S.</i> Features of the use semi-micro-column liquid chromatograph «Milichrom-6».....	120

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

УДК 004.942

В.К. МАНЖОСОВ, И.А. НОВИКОВА

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ С УБЫВАЮЩЕЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ НА ГРАНИЦЕ СОПРЯЖЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ С УПРУГОЙ ПРОКЛАДКОЙ

Рассмотрен процесс преобразования продольной волны деформации с убывающей интенсивностью на границе разнородных стержней с упругой прокладкой. Изложена процедура численного расчета процесса преобразования волны деформации в стержневой системе. Результаты моделирования сопоставлены с аналитическим решением для тестовой задачи. Сделана оценка эффективности переноса энергии волной деформации через сопряжение стержней.

Ключевые слова: волна деформации, преобразование волны деформации, трансформация волны деформации, интенсивность волны, энергия волны, сопряжение стержней, стержневая система, моделирование.

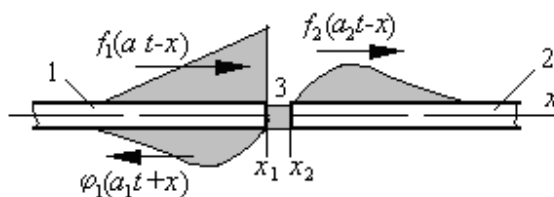
The paper considers the process of transformation of longitudinal deformation wave with decreasing intensity at the boundary of heterogeneous bars with an elastic gasket. The procedure of numerical computation of the process of deformation wave transformation in a bar system has been presented. Results of modeling have been compared with the analytical solution for a test problem. The effectiveness of energy transfer by deformation wave through the conjugation of bars has been assessed.

Key words: deformation wave, deformation wave transformation, transformation of deformation wave, wave intensity, wave energy, conjugation of bars, bar system, modeling.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При нанесении продольного удара по стержневой системе в последней формируется волна деформации, распространяющаяся к технологическому объекту или среде [1, 3, 4]. Если в стержневой системе имеются сопряжения разнородных участков, то на границе сопряжения возникают процессы, связанные с отражением и трансформацией волн [2, 6, 7].

В данной работе представлены результаты моделирования процесса преобразования продольной волны деформации с убывающей интенсивностью на границе разнородных стержней с упругой прокладкой. Схема стержневой системы изображена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Схема стержневой системы при падающей волне деформации
1, 2 – стержни системы; 3 – упругая прокладка**

Два полуограниченных разнородных стержня 1 и 2 в сечениях $x = x_1$ и $x = x_2$ разделены упругой прокладкой. Инерционными свойствами упругой прокладки пренебрегаем, учитывая лишь её упругие свойства.

На границу $x = x_1$ со стороны стержня 1 падает прямая волна, описываемая функцией $f_1(a_1t - x)$, где a_1 – скорость распространения волны в стержне 1. Параметры падающей волны считаются известными. Требуется определить формируемую в сечении $x = x_2$ прямую

волну $f_2 a_2 t - x$, распространяющуюся в направлении оси x по стержню 2 (a_2 – скорость распространения волны в стержне 2), и обратную волну $\varphi_1 a_1 t + x$, формирующуюся в сечении $x = x_1$ и распространяющуюся по стержню 1 в другом направлении.

Движение поперечных сечений рассматриваемой динамической системы описывается волновыми уравнениями

$$\frac{\partial^2 u_1(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{a_1^2} \frac{\partial^2 u_1(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad -\infty < x \leq x_1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 u_2(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{a_2^2} \frac{\partial^2 u_2(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad x_2 \leq x < \infty, \quad (2)$$

где $u_1(x,t)$, $u_2(x,t)$ – перемещения сечений соответственно 1-го и 2-го стержней, a_1 , a_2 – скорости распространения волн деформаций в стержнях.

Для стержня 1 перемещения поперечных сечений и скорость поперечных сечений в начальный момент времени $t=0$ определяются действием падающей волны и предполагаются известными:

$$u_1(x,0) = u_1(x), \quad \frac{\partial u_1(x,0)}{\partial t} = V(x).$$

Полагаем, что в начальный момент времени $t=0$ стержень 2 находится в состоянии покоя, продольные деформации в нём отсутствуют. Начальные условия для стержня 2 описываются равенствами: при $t=0$

$$\frac{\partial u_2(x,0)}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial u_2(x,0)}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Граничные условия рассматриваемой динамической системы имеют вид:

для сопряженных сечений $x = x_1$ и $x = x_2$

$$E_1 A_1 \frac{\partial u_1(x_1,t)}{\partial x} = E_2 A_2 \frac{\partial u_2(x_2,t)}{\partial x}, \quad E_2 A_2 \frac{\partial u_2(x_2,t)}{\partial x} = -k u_1(x_1,t) - u_2(x_2,t), \quad (4)$$

$$\text{для } x = -\infty \quad E_1 A_1 \frac{\partial u_1(-\infty,t)}{\partial x} = 0, \quad \text{для } x = \infty \quad E_2 A_2 \frac{\partial u_2(\infty,t)}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

где k – жесткость упругой прокладки;

E_1 , E_2 – модули упругости материала стержней;

A_1 , A_2 – площади поперечных сечений стержней.

Решения волновых уравнений (1) и (2) по методу Даламбера представим в виде

$$u_1(x,t) = f_1(a_1 t - x) + \varphi_1(a_1 t + x), \quad -\infty < x \leq x_1; \quad u_2(x,t) = f_2(a_2 t - x) + \varphi_2(a_2 t + x), \quad x_2 \leq x < \infty,$$

где $\varphi_2(a_2 t + x)$ – функция, описывающая обратную волну в стержне 2.

Из начальных условий (3) для стержня 2

$$f_2'(-x) + \varphi_2'(x) = 0, \quad -f_2'(-x) + \varphi_2'(x) = 0,$$

следует, что начальные волны $f_2'(-x)$ и $\varphi_2'(x)$ равны нулю. А так как обратная волна $\varphi_2(a_2 t + x)$ может формироваться в сечении $x = \infty$ после прихода туда прямой волны $f_2(a_2 t - x)$, сформированной в сечении $x = x_2$, то на конечном интервале времени примем, что $\varphi_2(a_2 t + x) = 0$ и решение волнового уравнения (2) представим как

$$u_2(x,t) = f_2(a_2 t - x), \quad x_2 \leq x < \infty.$$

Продольная деформация в сечениях $x = x_1$ и $x = x_2$ равна

$$\frac{\partial u_1(x_1,t)}{\partial x} = -f_1'(a_1 t - x_1) + \varphi_1'(a_1 t + x_1), \quad \frac{\partial u_2(x_2,t)}{\partial x} = -f_2'(a_2 t - x_2). \quad (6)$$

Используя (6) в первом граничном условии (4), имеем

$$E_1 A_1 \left[-f_1'(a_1 t - x_1) + \varphi_1'(a_1 t + x_1) \right] = E_2 A_2 - f_2'(a_2 t - x_2) ,$$

откуда следует, что

$$\varphi_1'(a_1 t + x_1) = -\frac{E_2 A_2}{E_1 A_1} f_2'(a_2 t - x_2) + f_1'(a_1 t - x_1) , \quad (7)$$

Интегрируя (7) в пределах от 0 до t

$$\int_0^t \varphi_1'(a_1 t + x_1) dt = -\frac{E_2 A_2}{E_1 A_1} \int_0^t f_2'(a_2 t - x_2) dt + \int_0^t f_1'(a_1 t - x_1) dt ,$$

приходим к равенству

$$\frac{1}{a_1} \varphi_1(a_1 t + x_1) - \varphi_1(x_1) = -\frac{E_2 A_2}{E_1 A_1} \frac{1}{a_2} f_2(a_2 t - x_2) - f_2(-x_2) + \frac{1}{a_1} f_1(a_1 t - x_1) - f_1(-x_1) ,$$

откуда

$$\varphi_1(a_1 t + x_1) = -\frac{E_2 A_2}{E_1 A_1} \frac{a_1}{a_2} f_2(a_2 t - x_2) + f_1(a_1 t - x_1) - f_1(-x_1) + \varphi_1(x_1) + f_2(-x_2) .$$

Полагая, что при $t=0$ перемещения сечений $x=x_1$ и $x=x_2$ в стержнях равны нулю (следовательно, продольная деформация $E_1 A_1 \left[-f_1'(-x_1) + \varphi_1'(x_1) \right] = 0$), а также учитывая, что начальная волна $f_2'(-x) = 0$, получим

$$\varphi_1(a_1 t + x_1) = -\frac{E_2 A_2}{E_1 A_1} \frac{a_1}{a_2} f_2(a_2 t - x_2) + f_1(a_1 t - x_1) .$$

Из второго граничного условия (4) с учетом, что

$$u_1(x, t) = f_1(a_1 t - x) + \varphi_1(a_1 t + x) \text{ и } u_2(x, t) = f_2(a_2 t - x) ,$$

имеем

$$E_2 A_2 - f_2'(a_2 t - x_2) = -k f_1(a_1 t - x) + \varphi_1(a_1 t + x) - f_2(a_2 t - x) ,$$

откуда, с учётом выражения для $\varphi_1(a_1 t + x_1)$, получим

$$f_2'(a_2 t - x_2) + \frac{k(r+1)}{E_2 A_2 \cdot r} f_2(a_2 t - x_2) = \frac{2k}{E_2 A_2} f_1(a_1 t - x_1) , \quad (8)$$

где $r = \frac{E_1 A_1}{a_2} \frac{a_1}{E_2 A_2}$ отношение волновых сопротивлений стержня 1 и стержня 2.

Из (8) при дифференцировании по t имеем

$$f_2''(a_2 t - x_2) = -\frac{k(r+1)}{E_2 A_2 \cdot r} f_2'(a_2 t - x_2) + \frac{2k}{E_2 A_2} \cdot \frac{a_1}{a_2} f_1'(a_1 t - x_1) . \quad (9)$$

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Решение дифференциального уравнения (9) строится методом последовательных приближений. Учитывая, что

$$a_2 f_2' a_2 t - x_2 = a_2 f_{2,0}'(a_2 t - x_2) + \int_{t_0}^t a_2^2 f_2'' a_2 t - x_2 dt ,$$

а также (9) для $f_2'' a_2 t - x_2$, получим для i -го приближения (в дальнейших выражениях для упрощения опущены аргументы функций)

$$f_{2,i}' = f_{2,0}' + a_2 \int_{t_0}^t \frac{k}{E_2 A_2} \left[2 \frac{a_1}{a_2} f_1' - \left(1 + \frac{1}{r} \right) f_{2,i-1}' \right] dt ,$$

где $f'_{2,0}$ – значение функции $f'_2(a_2t - x_2)$ при $t = t_0$, $i = 1, 2, 3, \dots$ – число последовательных приближений.

Аппроксимируем падающую волну f'_1 ступенчатыми участками постоянной интенсивности. Тогда на рассматриваемом малом интервале времени $t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$ $f'_1 = const$. В результате приходим к выражению

$$f'_{2,i} = f'_{2,0} + \frac{k}{E_2 A_2} a_2 \left[2 \frac{a_1}{a_2} f'_1 - \left(1 + \frac{1}{r} \right) f'_{2,i-1} \right] \Delta t, \quad (10)$$

где $\Delta t = t - t_0$.

Число последовательных приближений $i = 1, 2, 3, \dots$ стремится к тому значению, пока не будет обеспечено неравенство

$$\frac{f'_{2,i} - f'_{2,i-1}}{f'_{2,i}} \leq \Delta \tilde{f},$$

где $\Delta \tilde{f}$ – относительная малая величина, характеризующая степень приближения.

После того, как будет найдено значение f'_2 , используя (7), находим

$$\phi'_1(a_1t + x_1) = - \frac{E_2 A_2}{E_1 A_1} f'_2(a_2t - x_2) + f'_1(a_1t - x_1).$$

Рассмотрен случай, когда изменение падающей волны $f'_1(a_1t - x_1)$ описывается линейной функцией с отрицательным угловым коэффициентом (волна имеет треугольную форму):

$$f'_1(a_1t - x_1) = \begin{cases} \varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0}{T} \cdot t, & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t > T, \end{cases}$$

$$\tilde{f}'_1(a_1t - x_1) = \frac{f'_1(a_1t - x_1)}{\varepsilon_0} \begin{cases} 1 - \frac{t}{T}, & 0 \leq \frac{t}{T} \leq 1, \\ 0, & \frac{t}{T} > 1, \end{cases}$$

где ε_0 – максимальное значение модуля деформации в падающей волне;

T – длительность действия падающей волны $f'_1(a_1t - x_1)$;

t – время.

Формулу (10) представим в безразмерных параметрах:

$$\tilde{f}'_{2,i} = \tilde{f}'_{2,0} + \frac{k}{E_2 A_2} a_2 \left[2 \frac{a_1}{a_2} \tilde{f}'_1 - \left(1 + \frac{1}{r} \right) \tilde{f}'_{2,i-1} \right] \Delta t, \quad \tilde{f}'_{2,i} = \frac{f'_{2,i}}{\varepsilon_0}, \quad \tilde{f}'_{2,0} = \frac{f'_{2,0}}{\varepsilon_0}, \quad \tilde{f}'_{2,i-1} = \frac{f'_{2,i-1}}{\varepsilon_0}.$$

Преобразуем отношение $\frac{k}{E_2 A_2} a_2 \cdot \Delta t = \tilde{k} \cdot \tilde{T} \cdot \Delta \tilde{t}$, $\tilde{k} = \frac{k \cdot \Delta l}{E_2 A_2}$, $\tilde{T} = \frac{T}{\Delta T}$, $\Delta \tilde{t} = \frac{\Delta t}{T}$,

где Δl – единица длины стержня 2,

$\Delta T = \Delta l / a_2$ – время, в течение которого волна $f'_2(a_2t - x)$ пройдет расстояние Δl ;

\tilde{k} – отношение жесткости упругого элемента к продольной жесткости стержня 2, имеющего длину Δl .

Тогда имеем

$$\tilde{f}'_{2,i} = \tilde{f}'_{2,0} + \tilde{k} \cdot \tilde{T} \cdot \left[2 \frac{a_1}{a_2} \tilde{f}'_1 - \left(1 + \frac{1}{r} \right) \tilde{f}'_{2,i-1} \right] \Delta \tilde{t}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Осуществлена реализация предложенного алгоритма при моделировании процесса преобразования продольной волны на границе разнородных участков стержней, разделенных линейным упругим элементом.

Результаты моделирования сопоставлены с результатами расчета по аналитической зависимости, полученной в работе [5]:

$$\tilde{f}'_2(a_2t - x_2) = \frac{2r}{r+1} \cdot \frac{a_1}{a_2} \left[\left(1 + \frac{r}{(r+1) \cdot \tilde{T} \cdot \tilde{k}} \right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{r+1}{r} \cdot \tilde{k} \cdot \tilde{T} \cdot \frac{t}{T} \right) \right) - \frac{t}{T} \right], \quad 0 \leq \frac{t}{T} \leq 1. \quad (11)$$

$$\tilde{f}'_2(a_2t - x_2) = \tilde{f}'_2(a_2T - x_2) \cdot \exp\left(-\frac{(r+1) \cdot \tilde{k} \cdot \tilde{T}}{r} \left(\frac{t}{T} - 1 \right) \right), \quad \frac{t}{T} \geq 1. \quad (12)$$

В таблице 1 представлены результаты расчета параметров волны $\tilde{f}'_2(a_2t - x_2)$ на основе численного расчета и аналитического расчета по формулам (11), (12).

Таблица 1 – Результаты расчета параметров трансформированной волны $\tilde{f}'_2(a_2t - x_2)$ на основе численного расчета при моделировании процесса и аналитического расчета по формулам (11), (12)

Время, t/T	Падающая волна, $\tilde{f}'_1(a_1t - x_1)$	Трансформированная волна $\tilde{f}'_2(a_2t - x_2)$			
		Расчет по формулам (11), (12)	Моделирование	Расчет по формулам (11), (12)	Моделирование
		$\tilde{k} = 1$		$\tilde{k} = 2$	
0	1,0	0	0	0	0
0,1	0,9	0,172	0,169	0,312	0,305
0,2	0,8	0,294	0,290	0,488	0,480
0,3	0,7	0,376	0,372	0,573	0,565
0,4	0,6	0,426	0,421	0,597	0,590
0,5	0,5	0,448	0,443	0,581	0,574
0,6	0,4	0,448	0,443	0,536	0,531
0,7	0,3	0,430	0,425	0,474	0,470
0,8	0,2	0,397	0,392	0,399	0,396
0,9	0,1	0,352	0,348	0,316	0,314
1,0	0	0,297	0,293	0,227	0,225
1,1	0	0,243	0,240	0,152	0,152
1,2	0	0,199	0,197	0,102	0,102
1,3	0	0,163	0,162	0,0684	0,0694
1,4	0	0,133	0,133	0,0458	0,0469
1,5	0	0,109	0,109	0,0307	0,0317
1,6	0	0,089	0,089	0,0206	0,0214
1,7	0	0,073	0,073	0,0138	0,0144
1,8	0	0,060	0,06	0,0092	0,0097
1,9	0	0,049	0,049	0,0062	0,0066
2,0	0	0,04	0,04	0,0041	0,0044

Результаты моделирования представлены для следующих параметров стержневой системы: падающая волна треугольной формы длительностью $\tilde{T} = 1$, отношение волновых сопротивлений $r = 1$, скорости распространения волн $a_1 = a_2$; отношение жесткости упругого элемента к продольной жесткости единицы длины стержня $2 \tilde{k} \in (1, 2, 4, 5, 6, 8, 10)$.

При моделировании воспроизводились диаграммы падающей волны \tilde{f}'_1 , сформированной в сечении $x = x_2$ прямой волны \tilde{f}'_2 и обратной волны $\tilde{\varphi}'_1$ в сечении $x = x_1$ (часть диаграмм представлена на рисунке 2).

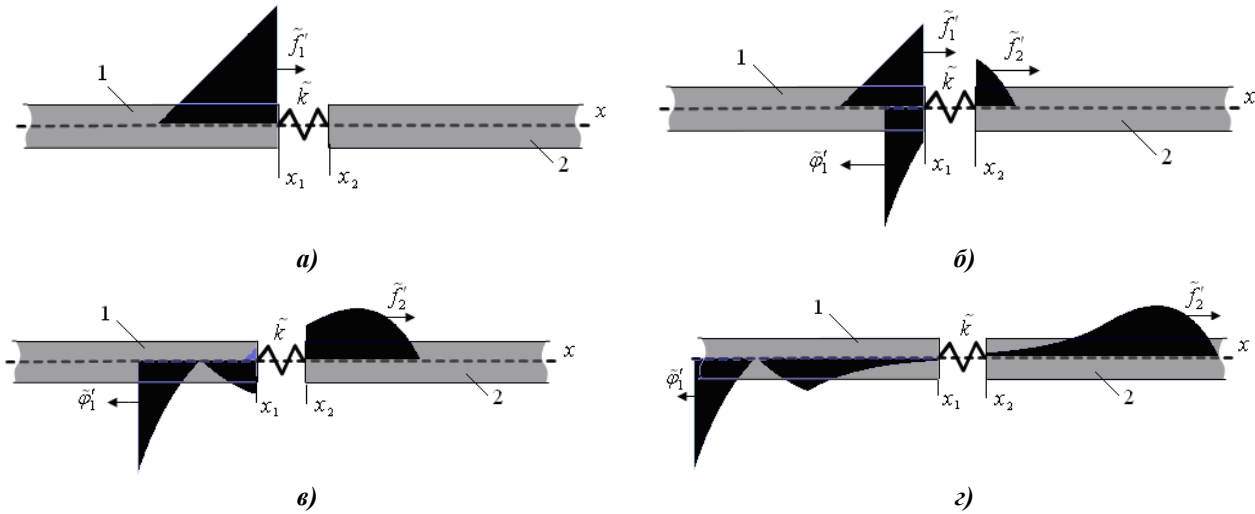


Рисунок 2 – Диаграммы прямых волн \tilde{f}'_1 , \tilde{f}'_2 и обратной волны $\tilde{\varphi}'_1$

а) диаграмма волны \tilde{f}'_1 при $t = 0$, б) диаграммы волн \tilde{f}'_1 , \tilde{f}'_2 , $\tilde{\varphi}'_1$ при $0 < t < T$,

в) диаграммы волн \tilde{f}'_2 , $\tilde{\varphi}'_1$ при $t = T$, з) диаграммы волн \tilde{f}'_2 , $\tilde{\varphi}'_1$ при $t = 2T$

Анализируя результаты, приведенные в табл. 1, заметим, что трансформированная волна $\tilde{f}'_2(a_2t - x_2)$ при определенных значениях времени t_*/T достигает максимального значения. Относительное время t_*/T , когда волна $\tilde{f}'_2(a_2t - x_2)$ достигает максимума, определяется [5] как

$$\frac{t_*}{T} = \frac{r}{(r+1) \cdot \tilde{k} \cdot \tilde{T}} \ln \left[1 + \frac{(r+1) \cdot \tilde{T} \cdot \tilde{k}}{r} \right].$$

На рисунке 3 представлены воспроизводимые при моделировании диаграммы падающей \tilde{f}'_1 и трансформированной \tilde{f}'_2 волн для различных значений относительной жесткости \tilde{k} . Относительное время $\tilde{t} = t/T$.

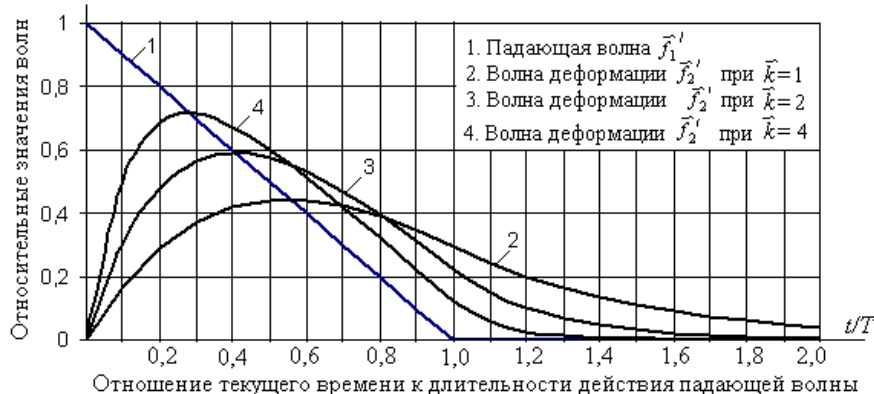


Рисунок 3 – Диаграммы волн \tilde{f}'_1 и \tilde{f}'_2 для различных значений жесткости \tilde{k}

Трансформированная волна имеет некоторый максимум и её форма отличается от формы падающей волны.

На диаграммах имеется два участка. На первом участке, трансформированная волна возрастает от нуля до своего максимального значения. Здесь происходит накопление энергии

в упругом элементе. На втором участке наблюдается обратная картина. Здесь значения трансформированной волны превышают значения падающей волны.

Анализируя результаты, заметим, что трансформация волны более существенна при меньших значениях жесткости упругого элемента \tilde{k} .

Обратимся к формулам (11), (12). При $\tilde{k} \rightarrow \infty$ слагаемые $\frac{r}{(r+1) \cdot \tilde{T} \cdot \tilde{k}} \rightarrow 0$ и $\exp\left(-\frac{r+1}{r} \cdot \tilde{k} \cdot \tilde{T} \cdot \frac{t}{T}\right) \rightarrow 0$. Формулы для расчета $\tilde{f}'_2(a_2t - x_2)$ принимают вид

$$\tilde{f}'_2(a_2t - x_2) = \frac{2r}{r+1} \cdot \frac{a_1}{a_2} \left(1 - \frac{t}{T}\right), \quad 0 \leq \frac{t}{T} \leq 1; \quad \tilde{f}'_2(a_2t - x_2) = 0, \quad \frac{t}{T} \geq 1.$$

Формулы описывают формируемую в стержне 2 волну деформации в случае идеального сопряжения стержней. Если стержни из одного материала ($a_1 = a_2$) и имеют равные волновые сопротивления, то при $\tilde{k} \rightarrow \infty$

$$\tilde{f}'_2(a_2t - x_2) = \left(1 - \frac{t}{T}\right) = \tilde{f}'_1(a_1t - 0), \quad 0 \leq \frac{t}{T} \leq 1; \quad \tilde{f}'_2(a_2t - x_2) = 0, \quad \frac{t}{T} \geq 1.$$

Это означает, что при $\tilde{k} \rightarrow \infty$ прошедшая в стержень 2 волна деформации $\tilde{f}'_2(a_2t - x_2)$ полностью воспроизводит падающую волну $\tilde{f}'_1(a_1t - x_1)$.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ СОПРЯЖЕНИЯ

Энергия падающей на границу сопряжения волны деформации, описываемой функцией $f_1(a_1t - x_1)$, равна

$$E_{f_1} = \int_0^T E_1 A_1 a_1 [f'_1(a_1t - x_1)]^2 dt. \tag{13}$$

Энергия прошедшей через границу сопряжения волны, описываемой функцией $f_2(a_2t - x_2)$,

$$E_{f_2} = \int_0^t E_2 A_2 a_2 [f'_2(a_2t - x_2)]^2 dt. \tag{14}$$

Коэффициент эффективности переноса энергии во второй стержень определяется отношением

$$\eta = E_{f_2} / E_{f_1}. \tag{15}$$

На рисунке 4 представлены результаты моделирования в виде диаграмм, характеризующих изменение коэффициента эффективности переноса энергии во второй стержень в зависимости от времени t/T для случая треугольной падающей волны с убывающей интенсивностью при соотношении волновых сопротивлений $r = 1$.

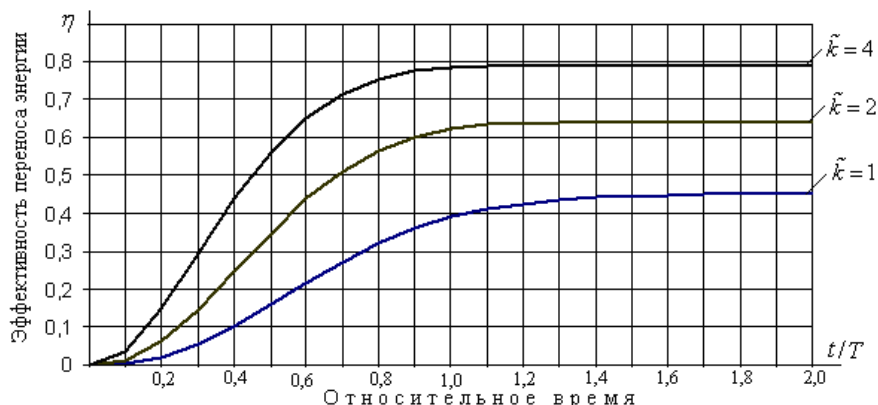


Рисунок 4 – Изменение эффективности переноса энергии волны деформации во времени

Чем больше жесткость упругого элемента, тем более эффективен процесс переноса энергии во второй стержень. Можно констатировать, что к моменту времени $t/T = 1$, значительная доля энергии будет перенесена во второй стержень. В этот момент падающая волна $f_1' a_1 t - x_1$ завершает свое действие. Некоторое увеличение переноса энергии в дальнейшем связано с преобразованием накопленной потенциальной энергии упругого элемента в энергию волны $f_2' a_2 t - x_2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов, О.Д. Распространение волн деформаций в ударных системах / О.Д. Алимов, В.К. Манжосов, В.Э. Еремьянц. – М.: Наука, 1985. – 354 с.
2. Алпеева, В.А. Возбуждение и преобразование волн деформаций в ударных системах машин для испытаний изделий: дисс. канд. техн. наук. / В.А. Алпеева. – Фрунзе: ФПИ, 1990. – 281 с.
3. Дворников, Л.Т. Продольный удар полукатеноидальным бойком / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – 80 с.
4. Манжосов, В.К. Продольный удар / В.К. Манжосов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 358 с.
5. Манжосов, В.К. Преобразование волны деформации линейной формы на границе сопряжения стержней с упругим элементом / В.К. Манжосов, И.А. Новикова. Ульяновск: Вестник УлГТУ, 2008. – № 3. с. 29 – 34.
6. Саруев, Л. А. Передача энергии по ставу штанг при продольном импульсном воздействии / Л.А. Саруев, А.П. Слистин, А.И. Авдеева. – Томск: ТПУ, 1995. – 6 с. – Деп. в ВИНТИ 29.11.95, № 3164-В95.
7. Слистин, А. П. Расчет параметров процесса передачи продольного ударного воздействия по стержням: автореф. дисс. канд. техн. наук / А. П. Слистин // Томск: ТПУ, 1990. – 18 с.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009 – 2013 гг), ГК № П 1122

Манжосов Владимир Кузьмич

ГОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»
 Доктор технических наук, профессор
 Заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»
 Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32
 Тел.: (8422) 778-262; 43-13-17
 E-mail: tpm@ulstu.ru, v.manjosov@ulstu.ru

Новикова Ирина Александровна

ГОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»
 Старший преподаватель кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы»
 Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32
 Тел.: (8422) 778-262; 43-13-84
 E-mail: tpm@ulstu.ru, nia@ulstu.ru

ТЕОРИЯ КВАДРАТИЧНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ДИСКА

В работе рассмотрено профилирование рабочей поверхности регулирующего диска пускозащитной муфты, которое позволяет получить требуемый закон движения машины.

Ключевые слова: технологическая машина, муфта, функционал, профилирование.

Is examined shaping the regulated disk of puskozashchitnoy cluch, which makes it possible to obtain the required law of the motion of the machine.

Key words: technological machine, clutch, functional, shaping.

Пускозащитные муфты [1] нашли широкое применение в машиностроении благодаря простоте и надежности работы, а правильный выбор профиля регулирующего диска позволяет получить требуемый закон движения рабочего органа технологической машины.

Форму рабочей поверхности регулирующего диска целесообразно выбирать из условий оптимального закона разгона машины, который должен задаваться из условия наименьших динамических нагрузок, а также заданного времени включения муфты.

Участок рабочей поверхности регулирующего диска, соответствующий неподвижному валу рабочей машины, не может быть выбран из соображений регулирования параметров разгона. На этом этапе важно обеспечить требуемое время безнагрузочного разгона электродвигателя, которое обычно определяют по угловой скорости двигателя. Целесообразно включать муфту (вращение ведомой части) на падающей ветви характеристики двигателя. В таком случае часть параметров должна находиться из условия, что кривая проходит через точки ($x=x_{вкл}$; $y=y_{вкл}$) и ($x=R_0$; $y=0$). Остальные параметры профиля находятся так, чтобы действительный закон изменения угловой скорости ротора электродвигателя был близок к заданному. Оптимальные законы разгона приведены на рисунке 1.

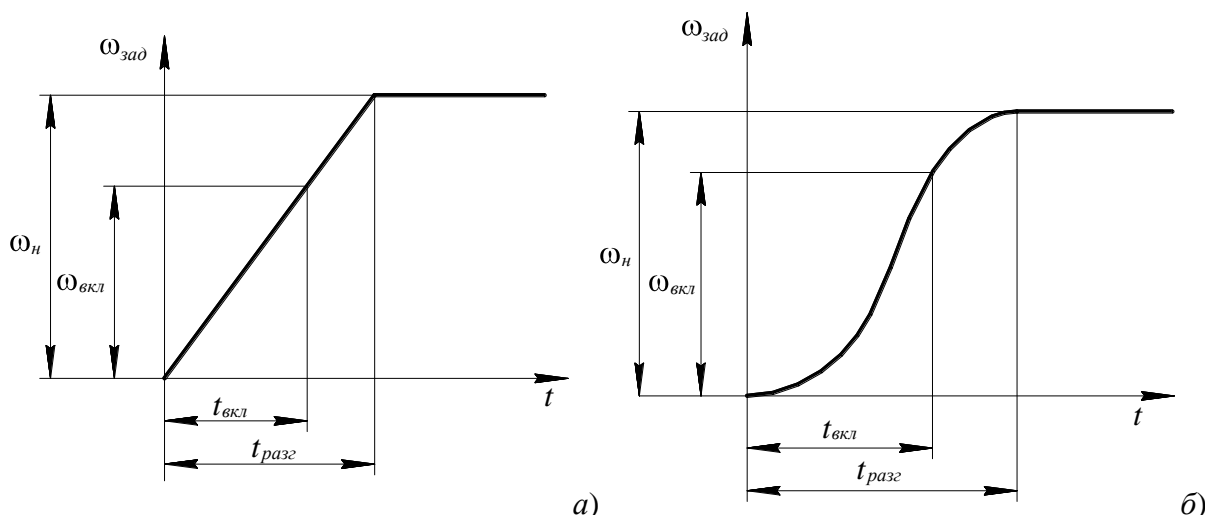


Рисунок 1 – Закон разгона ротора электродвигателя
а) угловая скорость изменяется по прямой; б) угловая скорость

Сначала рассмотрим случай, когда требуемая скорость меняется в общем случае по закону:

$$\omega_{зад} = \omega_{зад} \cdot \left(\frac{t}{t_{вкл}} \right)^n$$

Например, для случая (рисунок 1, а) $\omega_{зад} = \frac{\omega_{вкл}}{t_{вкл}} t$. Для случая (рисунок 1, б) скорость

выразим в виде:

$$\omega_{зад} = \omega_{вкл} \frac{1 - \cos \frac{\pi t}{t_p}}{1 - \cos \frac{\pi t_{вкл}}{t_p}}$$

Профиль регулирующего диска необходимо выбрать таким образом, чтобы действительная скорость разгона ротора электродвигателя была близка к заданной. Для решения этой задачи воспользуемся теорией квадратичного приближения функции. Как известно из [2], для этого необходимо найти минимум следующего функционала:

$$\Phi = \int_0^{t_{вкл}} (\omega_{зад} - \omega_1)^2 dt. \tag{1}$$

При этом $\omega_{зад} = \omega_{зад}(t)$ а угловая скорость ω_1 при безнагрузочном разгоне электродвигателя ($0 \leq t \leq t_1$) находится из уравнения:

$$J \frac{d\omega_1}{dt} = k_1 + k_2 \omega_1 - f'_A - c_1 \omega_1 - D, \tag{2}$$

где x и y – координаты теоретического профиля кривой.

Минимум функционала (1) можно найти путем составления и решения уравнений Эйлера для вариационной задачи [3]. Поскольку точного решения заданная вариационная задача не имеет, то воспользуемся приближенным решением по методу Ритца [3]. В этом случае значения функционала (1) надо рассматривать не на произвольных кривых данной задачи, а на некоторых линейных комбинациях заданной последовательности координатных функций, удовлетворяющей граничным условиям.

Пусть, например, для профилирования выбрана дуга окружности. Представим окружность в параметрическом виде (рисунок 2):

$$x = b + R \sin \psi; \quad y = a - R \cos \psi; \quad \psi_1 \rightarrow t_1; \quad \frac{\psi_1}{t_1} = \frac{\psi}{t}; \quad \psi = \frac{t}{t_1} \psi_1;$$

где ψ_1 – наибольшее значение параметра ψ , соответствующее t_1 . Тогда

$$x = b + R \sin \frac{\psi_1}{t_1} t; \tag{3}$$

$$y = a - R \cos \frac{\psi_1}{t_1} t. \tag{4}$$

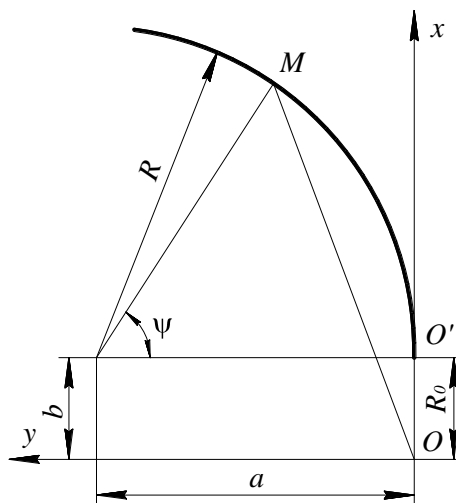


Рисунок 2 – Профилирование упорного диска

Рассмотрим профилирование регулирующего диска при безнагрузочном разгоне электродвигателя в пределах $0 \leq t \leq t_1$. Уравнения (3) и (4) должны удовлетворять граничным ус-

ловиям, которые имеют вид: $x(0) = R_0$;

$y(0) = 0$; $y(t_1) = y_1$; $R_0 = b + 0$; $b = R_0$; $0 = a - R$; $a = R$;

$$x = R_0 + R \sin \frac{\Psi_1 t}{t_1}; \quad y = R - R \cos \frac{\Psi_1 t}{t_1}.$$

Угол $\frac{\Psi_1 t}{t_1}$ мал. Разложим синус и косинус в ряды и оставим первые члены:

$$\sin \frac{\Psi_1 t}{t_1} \approx \frac{\Psi_1 t}{t_1}; \quad \cos \frac{\Psi_1 t}{t_1} \approx 1 - 0,5 \left(\frac{\Psi_1 t}{t_1} \right)^2;$$

$$x = R_0 + R \frac{\Psi_1 t}{t_1}; \quad y = R - R + 0,5 \left(\frac{\Psi_1 t}{t_1} \right)^2 R = 0,5 R \left(\frac{\Psi_1 t}{t_1} \right)^2.$$

Формула (2) примет вид:

$$I_n \frac{d\omega_1}{dt} = k_2 \omega_1 + k_1 - D - f'_A \left[F_{\min} + 0,5 c_1 R \left(\frac{\Psi_1 t}{t_1} \right)^2 \right] \left(R_0 + R \frac{\Psi_1 t}{t_1} \right). \quad (5)$$

Это неоднородное линейное уравнение, решаемое следующим образом:

$$I_n \frac{d\omega_1}{dt} - k_2 \omega_1 = 0; \quad \frac{I_n}{k_2} \frac{d\omega_1}{\omega_1} = dt; \quad \frac{I_n}{k_2} \int \frac{d\omega_1}{\omega_1} = \int dt; \quad \frac{I_n}{k_2} \ln \omega_1 = t + C,$$

поскольку $C = \text{const}$, можно взять любое постоянное число. Принимаем

$$C = \frac{I_n}{k_2} \ln C_3.$$

Тогда уравнение принимает вид: $\frac{I_n}{k_2} \ln \omega_1 = t + \frac{I_n}{k_2} \ln C_3$.

Для нахождения решения уравнения (5) используем метод вариации произвольной постоянной [3, 4]:

$$\frac{I_n}{k_2} \ln \frac{\omega_1}{C_3} = t; \quad \frac{\omega_1}{C_3} = e^{\frac{tk_2}{I_n}}; \quad \omega_1 = C_3 e^{\frac{tk_2}{I_n}}; \quad \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{dC_3}{dt} e^{\frac{tk_2}{I_n}} + \frac{k_2}{I_n} C_3 e^{\frac{tk_2}{I_n}}.$$

В окончательном виде решение принимает вид:

$$\omega_1 = \frac{1}{I_n} \left\{ f'_A F_{\min} R \frac{\Psi_1}{t_1} \frac{I_n}{k_2} t + 0,5 f'_A c_1 R R_0 \frac{\Psi_1^2}{t_1^2} \left(\frac{I_n}{k_2} t^2 + \frac{2I_n^2}{k_2^2} t \right) + \right. \\ \left. + 0,5 f'_A c_1 R^2 \frac{\Psi_1^3}{t_1^3} \left(\frac{I_n}{k_2} t^3 + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) \right\}; \quad (6)$$

При $t = t_1$ шар перемещается по оси y на величину $y_1 = h$. Величина y_1 известна из предыдущего расчета:

$$y_1 = a - R \cos \frac{\Psi_1}{t_1} t_1 = R \left(1 - \cos \Psi_1 \right); \quad \cos \Psi_1 = 1 - \frac{y_1}{R}; \quad \cos \Psi_1 \approx 1 - 0,5 \Psi_1^2; \quad 1 - \frac{y_1}{R} \approx 1 - 0,5 \Psi_1^2;$$

$$\Psi_1 = \sqrt{\frac{2y_1}{R}}; \quad \sin \frac{\Psi_1}{t_1} t \approx \frac{\Psi_1}{t_1} t.$$

$$\begin{aligned} \omega_1 = \frac{1}{I_n} & \left\{ f'_A F_{\min} R \sqrt{\frac{2y_I}{R}} \frac{I_n}{t_1} t + 0,5 f'_A c_1 R R_0 \frac{2y_I}{t_1^2} \left(\frac{I_n}{k_2} t^2 + \frac{2I_n^2}{k_2^2} t \right) + \right. \\ & \left. + 0,5 f'_A c_1 R^2 \frac{2y_I}{t_1^3} \sqrt{\frac{2y_I}{R}} \left(\frac{I_n}{k_2} t^3 + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) \right\} = \frac{1}{I_n} f'_A F_{\min} \times \frac{\sqrt{2y_I R}}{t_1} \frac{I_n}{k_2} t + \\ & \left. + f'_A c_1 R_0 \frac{y_I}{t_1^2} \left(\frac{I_n}{k_2} t^2 + \frac{2I_n^2}{k_2^2} t \right) + f'_A c_1 \frac{y_I \sqrt{2y_I R}}{t_1^3} \left(\frac{I_n}{k_2} t^3 + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) \right\}; \\ \frac{d\omega_1}{dR} = \frac{f'_A F_{\min} \sqrt{2y_I}}{t_1 k_2} \frac{1}{2} R^{-\frac{1}{2}} t + \frac{f'_A c_1 y_I \sqrt{2y_I}}{t_1^3} \frac{1}{2} R^{-\frac{1}{2}} & \left(\frac{1}{k_2} t^3 + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \right. \\ & \left. + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) = \frac{f'_A \sqrt{2y_I}}{2t_1 \sqrt{R}} \left[\frac{F_{\min}}{k_2} t + \frac{c_1 y_I}{t_1^2} \left(\frac{1}{k_2} t^3 + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) \right]. \\ \Phi = \int_0^{t_1} \omega_{зад} - \omega_1 dt; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial R} = 2 \int_0^{t_1} \omega_{зад} - \omega_1 \frac{d\omega_1}{dR} dt = 0; \\ \int_0^{t_1} \omega_{зад} - \omega_1 \frac{d\omega_1}{dR} dt = 0; \end{aligned} \tag{7}$$

Раскрывая уравнение (7), получим выражение для искомого радиуса окружности:

$$R = \left(\frac{A_1 - A_4 - A_5}{A_2 + A_3 + A_6 + A_7} \right)^2 \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \text{где } A_1 = \int_0^{t_1} \omega_{зад} & \left[\frac{F_{\min}}{k_2} t + \frac{c_1 y_I}{t_1^2} \left(\frac{t^3}{k_2} + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) \right] dt; \quad A_2 = \frac{2f'_A F_{\min}^2 \sqrt{y_I}}{3k_2 \sqrt{2}} t_1^3; \\ A_3 = \frac{f'_A F_{\min} c_1 \sqrt{y_I^3}}{\sqrt{2} k_2 t_1}; \quad A_4 = \frac{f'_A F_{\min} c_1 R_0 y_I}{k_2} & \left(\frac{t_1^3}{4k_2} + \frac{2I_n}{3k_2^2} t_1 \right); \\ A_5 = \frac{f'_A c_1^2 R_0 y_I^2}{t_1} & \left(\frac{t_1^3}{6k_2^2} + \frac{I_n}{k_2^3} t_1^2 + \frac{3I_n^2}{k_2^4} t_1 + \frac{4I_n^3}{k_2^5} \right); \quad A_6 = \frac{f'_A F_{\min} c_1 \sqrt{2y_I^3}}{k_2 t_1} \left(\frac{t_1^2}{4k_2} + \frac{I_n}{k_2^2} t_1 + \frac{3I_n^2}{k_2^3} \right); \\ A_7 = \frac{f'_A c_1^2 \sqrt{2y_I^5}}{t_1^2} & \left(\frac{t_1^4}{7k_2^2} + \frac{I_n}{k_2^3} t_1^3 + \frac{2I_n^2}{5k_2^4} t_1^2 + \frac{9I_n^3}{k_2^5} t_1 + \frac{12I_n^4}{k_2^6} \right). \end{aligned}$$

Величина A_1 определяется в зависимости от функции $\omega_{зад}$. Так, если $\omega_{зад} = \omega_{вкл} t / t_{вкл}$, то

$$A_1 = \frac{\omega_{вкл}}{t_{вкл}} \left[\frac{F_{\min} t_1^3}{6k_2} + c_1 y_I \left(\frac{t_1^3}{5k_2} + \frac{3I_n}{4k_2^2} t_1^2 + \frac{2I_n^2}{k_2^3} t_1 \right) \right].$$

При уточненном расчете следует величину R найти из следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} m + Ex^2 \frac{d\omega_1}{dR} = k_1 + k_2\omega_1 - f'_A F_{\min} + c_1 y \ddot{x} - D; \\ \int_0^{t_1} (\omega_{зад} - \omega_1) \frac{d\omega_1}{dR} dt = 0; \\ \cos \Psi_I = \frac{R - y_I}{R}; \\ \omega_{зад} = \frac{\omega_{вкл}}{t_{вкл}} t, \text{ или } \omega_{зад} = \omega_{вкл} \frac{1 - \cos \frac{\pi t}{t_p}}{1 - \cos \frac{\pi t_{вкл}}{t_p}}; \\ x = R_0 + R \sin \frac{\Psi_I t}{t_I}; \\ y = R - R \cos \frac{\Psi_I t}{t_I}. \end{array} \right. \quad (9)$$

Систему уравнений (9) можно решить только приближенно с использованием компьютерных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеева, Е.Н. Динамика безнагрузочного разгона механической пусковой муфты, применяемой в приводах транспортных машин // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт» / Е.Н. Корнеева, В.А. Гордон - Орел: ОрелГТУ 2008, № 1/17 (542).- С. 75-84.
2. Демидович, Б.П. Численные методы анализа / Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова – М.: Наука, 1967. – 368с.
3. Эльсгольц, Л.Э. Вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц – М.: КомКнига, 2006. – 205с.
4. Зельдович, Я.Б. Элементы прикладной математики / Я.Б. Зельдович, А.Д. Мышкис – М.: Наука, 1967.

Корнеева Елена Николаевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: 41-98-48
E-mail: Gordon@rambler

Гордон Владимир Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: 41-98-48
E-mail: Gordon@rambler

Корнеев Юрий Степанович

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

В.Г. ЗУБЧАНИНОВ, Н.Л. ОХЛОПКОВ, С.А. СОКОЛОВ

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ БИФУРКАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ СЛОЖНОГО ХАРАКТЕРА ДЕФОРМИРОВАНИЯ В МОМЕНТ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ СЛОЖНОМ ДОКРИТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Рассматривается задача бифуркации тонкостенной круговой цилиндрической оболочки с учетом сложного характера деформирования в момент потери устойчивости при сложном докритическом нагружении осевой сжимающей силой и крутящим моментом в девиаторном пространстве деформаций А.А.Ильюшина $\mathcal{E}^{(3)}$.

Ключевые слова: пластичность, устойчивость, сложное нагружение, бифуркация, оболочка.

In this article the problem of bifurcation of the thin-walled circular cylindrical shell under compound deformation in the moment of loss of stability is being considered. Undercritical loading is compound. It is full failed by means of axial compressing force and torque moment in A.A.Ilyushins's space of deformation.

Key words: plasticity, stability, compound loading, bifurcation, shell.

Решение задачи строится на основе теории неупругих систем В.Г.Зубчанинова. Используется условие несжимаемости материала и условие однородности напряженного состояния в оболочке до момента потери устойчивости. Задача решается в геометрически линейной постановке.

Для решения задачи бифуркации оболочки при сложном комбинированном докритическом нагружении в каждой точке траектории деформации необходимо знать значения компонентов напряженного состояния. Таким образом, задача состоит из двух частей: построение образа процесса нагружения материала и собственно решение задачи бифуркации.

Уравнения связи напряжений и деформаций в момент потери устойчивости оболочки и при построении образа процесса нагружения принимаем в соответствии с определяющими соотношениями гипотезы компланарности, которые в скоростях принимают вид [2]

$$\dot{S}_{ij} = N\dot{\mathcal{E}}_{ij} + \sigma' - N\tau \dot{S} \frac{S_{ij}}{\sigma}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

где $\sigma' = d\sigma/dS = P\tau$; $\tau = \cos \mathcal{A}_1$; $\mathcal{E}_{ij} = e_{ij}$; S_{ij} – компоненты тензора-девиатора напряжений;

\mathcal{E}_{ij} – компоненты тензора-девиатора деформаций.

Здесь $d\sigma/dS$, N – определяющие функции пластичности, \mathcal{A}_1 – угол сближения ($\cos \mathcal{A}_1 = \hat{\sigma} \cdot \hat{p}_1$), S – длина дуги траектории деформации. Символ с точкой наверху означает дифференцирование по обобщенному параметру времени $d/dt = d/dS \cdot dS/dt$.

Рассмотрены траектории деформаций двух типов: траектории в виде двузвенных ломаных и траектории в виде дуг окружностей с выходом на линейный участок в плоскости \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3 , реализованные на тонкостенных круговых цилиндрических оболочках из стали 45. Данные процессы экспериментально реализованы на комплексе СМ-ЭВМ в лаборатории кафедры «Сопrotивления материалов, теории упругости и пластичности» Тверского государственного технического университета [3]. Общий вид реализованных траекторий приведен на рисунке 1.

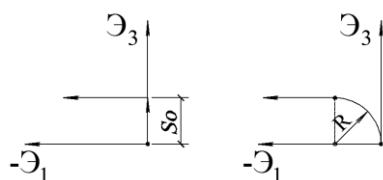


Рисунок 1 – Траектории деформирования образцов из стали 45

S_0 – длина первого звена;

R – радиус дуги окружности

1 и 1.5 процента.

Для определяющих функций пластичности N и $d\sigma/dS$ принимаем аппроксимации предложенные В.Г.Зубчаниновым [1].

Для траекторий типа 1 – S_0 принято 0.75, 1 и 1.5 процента, для траекторий типа 2 – R принято также 0.75,

$$N = 2G_p + [2G - 2G_p] \left(\frac{1 - \cos \vartheta_1}{2} \right)^q$$

$$\frac{d\sigma}{dS} = 2G_k - 2G + 2G_k \left(\frac{1 - \cos \vartheta_1}{2} \right)^p$$
(2)

где G , G_k , G_p – модуль сдвига, касательный и секущий модули сдвига материала соответственно.

Показатели степеней p и q входящие в состав аппроксимаций определяющих функций пластичности при теоретическом построении образа процесса нагружения принимались для траекторий первого типа $p=2.15$ и $q=0.5$, для траекторий второго типа $p=1.45$ и $q=0.3$.

Для определения угла сближения ϑ_1 имеем:

$$\dot{\vartheta} = - \left(\frac{\sigma \sin \vartheta_1}{N} - \chi_1 \right)$$
(3)

где σ – модуль вектора напряжений;

χ_1 – кривизна траектории.

Уравнения (1) и (3) имеют вид уравнений задачи Коши, которую решаем методом Рунге-Кутты. Зависимость $\sigma = \Phi(\vartheta) = \Phi(S)$ полагаем универсальной для простого нагружения.

Таким образом, в каждой точке траектории деформаций определяем компоненты напряженного состояния и далее решаем бифуркационную задачу.

Дифференциальные уравнения равновесия элемента цилиндрической оболочки, потерявшей устойчивость, и уравнения совместности деформаций имеют вид [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{T}_{11}}{\partial X_1} + \frac{\partial \dot{T}_{12}}{\partial X_2} = 0, \frac{\partial \dot{T}_{22}}{\partial X_2} + \frac{\partial \dot{T}_{12}}{\partial X_1} = 0 \\ \frac{\partial^2 \dot{M}_{11}}{\partial X_1^2} + 2 \frac{\partial^2 \dot{M}_{12}}{\partial X_1 \partial X_2} + \frac{\partial^2 \dot{M}_{22}}{\partial X_2^2} + T_{11} \dot{\chi}_{11} + T_{22} \dot{\chi}_{22} + 2T_{12} \dot{\chi}_{12} + \frac{1}{R} \dot{T}_{22} = 0, \\ \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_{11}}{\partial X_2^2} + \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_{22}}{\partial X_1^2} - 2 \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_{12}}{\partial X_1 \partial X_2} = - \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial^2 \dot{W}}{\partial X_1^2} \end{cases}$$
(4)

где $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – скорости деформирования срединной поверхности;

$\dot{\chi}_{ij}$ – скорости изменения кривизны и кручения срединной поверхности,

W – функция прогибов оболочки.

Первые два уравнения системы (4) будут удовлетворены, если положить

$$\dot{T}_{11} = Eh \frac{\partial^2 \varphi}{\partial X_2^2}, \dot{T}_{22} = Eh \frac{\partial^2 \varphi}{\partial X_1^2}, \dot{T}_{12} = -Eh \frac{\partial^2 \varphi}{\partial X_1 \partial X_2}$$
(5)

где φ – функция скоростей усилий;

E – модуль Юнга.

h – толщина оболочки.

Решение основных уравнений задачи (4) представляем в виде рядов Фурье

$$\begin{cases} \dot{W} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin \frac{1}{R} \lambda_m X_1 - n X_2 \\ \varphi = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin \frac{1}{R} \lambda_m X_1 - n X_2, \lambda_m = \frac{m\pi R}{L} \end{cases}$$
(6)

где m , n – целые числа, определяющие число полуволен в направлениях X_1 , X_2 соответственно (X_1 – в направлении образующей, X_2 – в окружном направлении);

L – длина рабочей зоны оболочки;

R – радиус срединной поверхности.

Оболочку принимаем «длинной», шарнирно подкрепленной по торцам. В уравнениях (6) сохраняем по одному члену ряда [1].

В результате, окончательно получаем систему алгебраических уравнений задачи о собственных числах [1]

$$\begin{cases} -\sigma K_* i^2 / g_1 E + i \Omega_1^{**} / 2 g_1 S_* = \lambda_m^2 \left[\theta + 3 K_* \Omega_2^{**} - \Omega_1^{**} N_2^* / N_1^* / 4 g_1 \right], \\ e = -2i / S_* \lambda_m^2 - \theta_1 \Omega_1^{**} + N_2^* K_* / N_1^* \end{cases}, \quad (7)$$

где

$$K_* = \sigma_{11}^* + \sigma_{22}^* r^2 - 2\sigma_{12}^* r, \quad S_* = S_{11}^* r^2 + S_{22}^* + 2S_{12}^* r, \quad \sigma_{ij}^* = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma}, \quad S_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{\sigma}, \quad r = \frac{n}{\lambda_m},$$

$$g_1 = \frac{D_1}{D} = \frac{3}{2} \left(N_3^* - \frac{N_2^{*2}}{N_1^*} \right), \quad \theta = 1 + r^2 - K_*^2 / 2, \quad \theta_1 = 2 + r^2 / 3 S_*^2 - 1, \quad (8)$$

$$2G \cdot N_m^* = \int_{-1}^1 N z^*{}^{m-1} dz^*, \quad 2G \cdot \Omega_m^{**} = \int_{-1}^1 \sigma' \dot{S}^* z^*{}^{m-1} dz^*, \quad z^* = z/h$$

где $i = 3R/h$ – гибкость оболочки.

Решение бифуркационной задачи позволяет для заданной комбинации полуволн m , n вычислить критическую гибкость оболочки i в зависимости от значения модуля вектора напряжений σ в момент потери устойчивости.

Эксперименты показывают [1], что в момент бифуркации пластин и оболочек происходит излом траекторий деформирования, т.е. процесс потери устойчивости реализуется в условиях сложного нагружения материала. Для определяющих функций пластичности N и $d\sigma/dS$ принимаем аппроксимации В.Г. Зубчанинова (2) [1].

В большинстве выполненных ранее решений, сложное нагружение оболочки в момент потери устойчивости учитывалось в упрощенной постановке. Полагалось, что в зоне пластической догрузки $\vartheta_1 = 0^0$ ($\tau = 1$), в зоне упругой разгрузки $\vartheta_1 = 180^0$ ($\tau = -1$) и искалась координата z_p^* границы раздела данных зон. В предлагаемом варианте решения задачи функции пластичности N и $d\sigma/dS$ изменяются непрерывно, в зависимости от τ и z . Координату границы раздела зон определять нет необходимости, интегралы Ω_m^{**} и N_m^* в (8) определяются численно по методу Симпсона. При этом оболочка по толщине разбивается на 20 слоев (дальнейшее увеличение числа слоев, как показывают расчеты, не приводит к сколь нибудь существенному уточнению решения).

В качестве нулевого приближения на каждом этапе нагружения оболочки используется решение при чистопластической бифуркации, когда излом траектории не учитывается. В этом случае $\tau = 1$, тогда $\dot{S}^* = e + z^* k_*$ интегралы Ω_m^{**} , N_m^* (8) принимают значения [1]

$$\begin{aligned} N_1^* &= 2(1-\omega), \quad N_2^* = 0, \quad N_3^* = 2(1-\omega)/3, \\ \Omega_1^{**} &= 2e(1-\lambda), \quad \Omega_2^{**} = 2(1-\lambda)k_*/3, \quad g_1 = 1-\omega, \\ e &= -2i / S_* \lambda_m^2 \nu_2, \quad \nu_2 = 1 + \nu_1(1-\lambda) / (1-\omega) \end{aligned} \quad (9)$$

где ω – параметр пластичности А.А. Ильюшина;

λ – параметр разупрочнения материала.

При известных σ , ω , λ с учетом (9) можно вычислить критическую гибкость оболочки в нулевом приближении i^0

$$i^0 = \lambda_m \sqrt{-\left[2g_1 v + 1 - \lambda k_*^2\right] / \left[4 \left(1 - \lambda / S_*^2 \lambda_m^2 v_2 + 2\sigma k_* / E\right)\right]} \quad (10)$$

Затем, в нулевом приближении, находим $f_1^0 = -\Omega_1^{**} / k_*$ и определяем параметры деформаций $e^0, \varepsilon_1^0, \varepsilon_2^0, \varepsilon_3^0$ из уравнений [1]

$$\begin{aligned} N_1 \varepsilon_1 &= k_* f_1 \left[S_{11}^* + 1 - 2r^2 / 3S_* \right] + N_2^* S_{11}^* k_* - 1 + S_{11}^* N_1^* e \\ N_1 \varepsilon_2 &= k_* f_1 \left[S_{22}^* + r^2 - 2 / 3S_* \right] + N_2^* S_{22}^* k_* - r^2 + S_{22}^* N_1^* e. \\ N_1 \varepsilon_3 &= k_* f_1 \left[S_{12}^* + r / S_* \right] + N_2^* S_{12}^* k_* + r + S_{12}^* N_1^* e \end{aligned} \quad (11)$$

Далее, в первом приближении вычисляем для каждого сечения оболочки параметр излома траектории τ^1 , скорость деформаций \dot{S}^{*1}

$$\dot{S}^{*2} = 2 \left[P_{ee}^0 - z h P_{ek}^0 + z^{*2} h^2 P_{kk}^0 / 4 \right], \tau = e + z^* k_* \dot{S}^{*-1} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} P_{ee}^0 &= \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2, \\ P_{ek}^0 &= \left[-2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - r^2 2\varepsilon_2 + \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 r \right] / h, \\ P_{kk}^0 &= 4 \left(1 + r^2 \right)^2 / h^2, \end{aligned} \quad (13)$$

$$e = \sigma_{11}^* \varepsilon_1 + \sigma_{22}^* \varepsilon_2 + 2\sigma_{12}^* \varepsilon_3. \quad (14)$$

Далее численно определяем значения интегралов Ω_m^{**} и N_m^* , вычисляем i^1, e^1 и рассчитываем невязку по параметру e : $\Delta e^i = e^i - e^{i-1}$. В случае, если на данном шаге Δe больше некоторого малого наперед заданного ξ , методом половинного деления вводим корректуру в e . Итерационный процесс продолжаем до тех пор, пока невязка Δe будет меньше ξ .

На рисунках 2 и 3 в качестве примера решения приведены графики критических параметров напряжений для двух процессов сложного докритического нагружения оболочки.

Цифрами на рисунках обозначено: 1 – расчет выполненный с учетом сложного характера нагружения в момент потери устойчивости при показателях степеней $p=2.15$ и

$q=0.5$ (данные значения p и q соответствуют принятым при решении задачи построения образа процесса нагружения для траекторий типа 1); 2 – то же при показателях степеней $p=1.5$ и $q=0.75$; 3 – то же, при показателях степеней $p=1$ и $q=1$; 4 – расчет при $p=1.45$ и $q=0.3$ (данные значения p и q соответствуют принятым при решении задачи построения образа процесса нагружения для траекторий типа 2); 5 – то же, при показателях степеней $p=1.2$ и $q=0.6$. Треугольниками на рисунках отмечены экспериментальные данные.

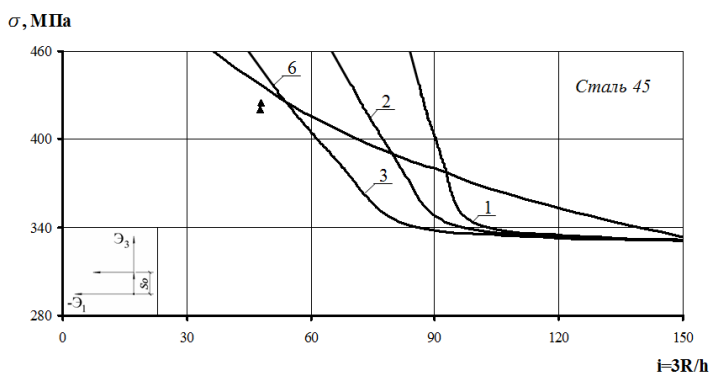


Рисунок 2 – Критические параметры напряжений ($S_0=1\%$)

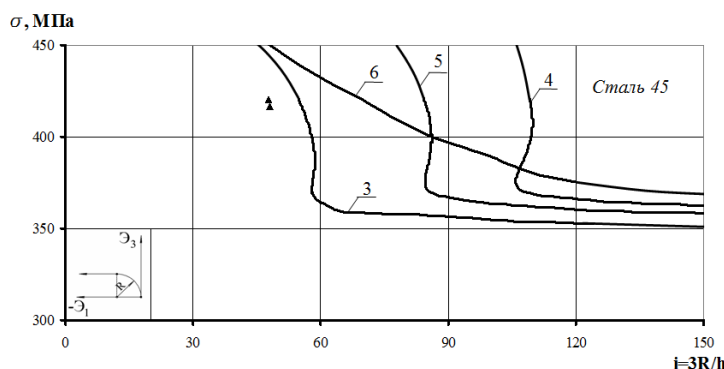


Рисунок 3 – Критические параметры напряжений ($R=1\%$)

Выполненные расчеты сопоставлены с решением задачи на основе теории устойчивости А.А. Ильюшина с учетом разгрузки материала в момент потери устойчивости [1] – кривые 6 на рисунках 2, 3.

На рисунке 4 для траекторий типа 1 в девиаторной плоскости деформаций показаны зоны устойчивых состояний оболочки. Кружками обозначены экспериментальные точки, треугольниками – расчеты по теории устойчивости А.А. Ильюшина с учетом разгрузки, прямоугольниками расчеты выполненные по предложенной методике при показателях степеней $p=1$ и $q=1$.

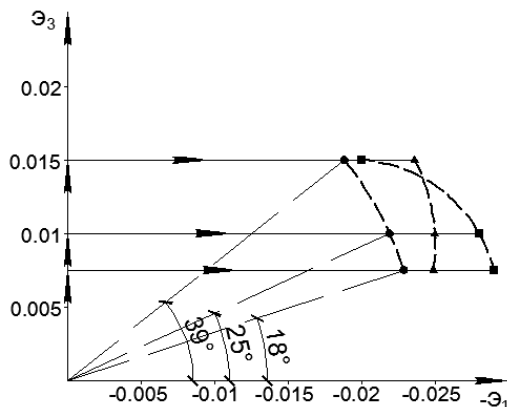


Рисунок 4 – Зоны устойчивых состояний в плоскости \mathcal{E}_1 – \mathcal{E}_3 для оболочек из стали 45

Анализ полученных результатов показал, что материальные параметры p и q аппроксимаций N и $d\sigma/dS$ (2) должны приниматься различными при решении задачи построения образа процесса нагружения материала и в решении задачи бифуркации см. рисунки 2 и 3. Так, использование в решении задачи устойчивости для параметров p и q значений, принятых при решении задачи построения образа процесса нагружения $p=2.15$, $q=0.5$ (траектории типа 1) и $p=1.45$, $q=0.3$ (траектории типа 2) приводит к существенному отличию расчетных и экспериментальных величин критических параметров напряжений.

Наилучшее приближение к экспериментальным данным показывает решение, полученное при значениях материальных параметров аппроксимаций $p=1$, $q=1$. Для рассмотренных процессов отличие экспериментальных данных от теоретических по критическим параметрам напряжений не превышает 10%.

На основании результатов представленных на рисунке 4 можно сделать вывод о том, что если в точку потери устойчивости при сложном докритическом процессе условно, из начала координат плоскости \mathcal{E}_1 – \mathcal{E}_3 , направить луч пропорционального процесса, то влияние сложного нагружения в момент бифуркации начинает существенно проявляться при угле наклона данного пропорционального процесса к оси \mathcal{E}_1 большем 30° , если данный угол меньше, то решение задачи бифуркации следует строить на основе теории устойчивости А.А.Ильюшина с учетом разгрузки. Данный вывод подтверждает результаты работы [4], полученные для пропорциональных процессов докритического нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубчанинов, В.Г. Устойчивость и пластичность. Т. 1. Устойчивость / В.Г. Зубчанинов. – М.: Физматлит, 2007. – 448 с.
2. Зубчанинов, В.Г. Математическая теория пластичности: монография / В.Г. Зубчанинов. – Тверь: ТГТУ, 2002. – 300 с.
3. Зубчанинов, В.Г. Экспериментальная пластичность: монография. Книга 1. Процессы сложного деформирования / В.Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков, В.В. Гараников. – Тверь: ТГТУ, 2003. – 172 с.
4. Охлопков, Н.Л. О влиянии сложного характера деформирования в момент потери устойчивости на критические параметры напряжений круговой цилиндрической оболочки / С.А. Соколов, Н.Л. Охлопков // Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. – Тверь: ТГТУ, 2008. – Вып. 13. – С. 229-234.

Зубчанинов Владимир Георгиевич

Тверской государственный технический университет, г. Тверь
Доктор физико-математических наук, профессор, зав.кафедрой «Сопrotивление материалов теории упругости и пластичности»
Тел. 8(4822)35-30-77

Охлопков Николай Леонидович

Тверской государственный технический университет, г. Тверь
Доктор технических наук, профессор, кафедры «Сопrotивление материалов теории упругости и пластичности»
Тел. 8(4822)35-30-77

Соколов Сергей Александрович

Тверской государственный технический университет, г. Тверь
Доцент кафедры «Сопrotивление материалов теории упругости и пластичности»
Тел. 8(4822)35-20-98
E-mail: gek.tver@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ ЗАКРЫТОЙ ЕМКОСТИ В СЛУЧАЕ ЕЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ*

Сформулирована и решена задача истечения жидкости из закрытой ёмкости при её повреждении. Показано, что истечение является автоколебательным за счёт периодического образования пузырей воздуха в отверстии стока, существенно отличающемся качественно и количественно от истечения в случае открытой ёмкости. Выяснено, что параметры образующихся пузырей в процессе истечения меняются незначительно, а уровень воды снижается по закону, близкому к линейному.

Ключевые слова: закрытая ёмкость, повреждение, истечение, пузырь, модель.

The problem of the expiration of a liquid from the closed capacity is formulated and solved at its damage. It is shown that the expiration is self-oscillatory for the account of periodic formation of bubbles in a drain aperture, essentially differing qualitatively and quantitatively from the expiration in case of open capacity. It is found out that parameters of formed bubbles in the course of the expiration vary slightly, and the water level decreases under the law close to the linear.

Key words: closed capacity, damage, expiration, bubble, model.

ВВЕДЕНИЕ

Использование для описания утечек жидкости из разрушенной закрытой ёмкости известных решений, полученных для случая открытой ёмкости, неприемлемо по причине изменения (падения) со временем давления над зеркалом. Это обстоятельство приводит к качественно другому характеру истечения жидкости, что представляет интерес.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Представим закрытую ёмкость в виде цилиндрического сосуда с утечкой в основании. Как показали эксперименты, истечение через это отверстие характерно тремя этапами. На первом истечение продолжается до тех пор, пока давление воздуха над зеркалом жидкости не станет таким, что давление на срезе отверстия станет равным атмосферному. Однако в силу инерционных процессов течение продолжится, пока динамический напор струи не уравновесится падением давления на входе в отверстие ниже атмосферного.

$$\rho_B \cdot S_0 \cdot \left(\frac{dh(t)}{dt} \right) = \rho_B \cdot S_0 \cdot \left(\frac{S_0}{S_1} - 1 \right) \cdot \frac{dh(t)}{dt} \cdot \left| \frac{dh(t)}{dt} \right| =$$

$$= \left(\rho_B \cdot g \cdot h_{\text{воды}} - h(t) \right) \cdot P_{\text{вн}} \cdot \frac{h_{\text{возд}}}{h_{\text{возд}} + h(t)} - P_{\text{внеш}} \cdot S_1, \quad (1)$$

где ρ_B – плотность воды, кг/м³;

S_0 – площадь поперечного сечения ёмкости, м²;

$h_{\text{воды}}$ – начальный уровень воды, м;

$h(t)$ – изменение уровня воды от положения $h_{\text{воды}}$, м;

S_1 – площадь отверстия, м²;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$P_{\text{вн}}, P_{\text{внеш}}$ – давление воздуха внутри и снаружи ёмкости, Па;

$h_{\text{возд}}, h_{\text{возд}}^v$ – начальный и текущий уровни воздуха в ёмкости, м.

На втором этапе струя обрывается и за счёт движения столба воды в ёмкости вверх через отверстие стока втягивается воздух вовнутрь ёмкости: образуется пузырь. И в этом случае при образовании пузыря жидкость в ёмкости устремляется обратно вверх, «проскакивая» положение равновесия. Динамика образования пузыря описывается уравнением

$$\rho_B \cdot S_0 \cdot \left(\frac{dh(t)}{dt} \right) =$$

$$= \left(\rho_B \cdot g \cdot \left(h_{\text{воды}} - \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} |h(t)| \cdot S_0} \right) + P_{\text{вн}} \cdot \frac{h_{\text{возд}}}{h_{\text{воздв}} + h(t)} - P_{\text{внеш}} \right) \times \left(S_1 + 4\pi \left(\sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} h(t) \cdot S_0} \right)^2 \right). \quad (2)$$

На третьем этапе по достижению определённых размеров пузырь воздуха отрывается от отверстия и всплывает. В это время идёт истечение жидкости. По достижению пузырьём зеркала жидкости он схлопывается и увеличивает объём воздуха над зеркалом жидкости. Цикл истечения повторяется, при этом формируется автоколебательный процесс, этот этап описывается уравнением, которое обобщает уравнение (1) за счёт учёта изменения уровня воды в ёмкости

$$\begin{aligned} \rho_B \cdot S_0 \cdot \left(h_{\text{воды}} - h(t) \right) \cdot \frac{d^2 h(t)}{dt^2} + \rho_B \cdot S_0 \cdot \left(\frac{S_0}{S_1} - 1 \right) \cdot \frac{dh(t)}{dt} \cdot \left| \frac{dh(t)}{dt} \right| = \\ = \left(\rho_B \cdot g \cdot \left(h_{\text{воды}} - \Delta - h(t) \right) + P_{\text{вн}} \cdot \frac{h_{\text{возд}}}{h_{\text{воздв}} + \Delta + h(t)} - P_{\text{внеш}} \right) \cdot S_1, \end{aligned} \quad (3)$$

где Δ – значение изменения уровня воды при образовании пузыря, м.

Уравнения (1), (2) и (3) в совокупности с начальными условиями

$$h_{\text{воды}}(0) = h_{\text{воды}0} \text{ и } h_{\text{возд}}(0) = h_0 - h_{\text{воды}0},$$

где h_0 – высота ёмкости,

и геометрическими характеристиками ёмкости и повреждения описывают динамику истечения из ёмкости и представляют собой задачу Коши.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Задача не имеет аналитического решения. Её численное решение осуществлялось методом Рунге-Кутты четвёртого порядка. В качестве примера рассмотрено истечение воды из ёмкости с поперечным сечением $S_0=0,053 \text{ м}^2$ ($d_0=260 \text{ мм}$) и высотой $h_0=0,5 \text{ м}$, заполненной на

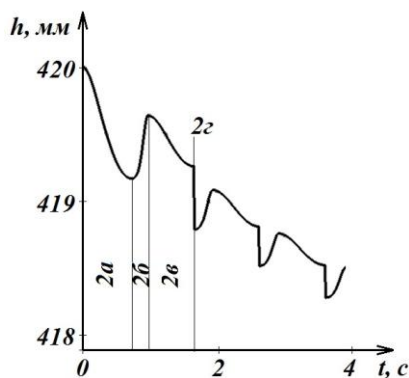


Рисунок 1 – Изменение уровня воды во времени

$h_{\text{воды}0}=0,4 \text{ м}$. Диаметр отверстия в нижней части сосуда равен $S_1=7,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ($d=30 \text{ мм}$). В качестве основного результата получено изменение уровня воды по времени (рисунок 1); уровень воды в ёмкости совершает колебательные движения вверх-вниз в такт образованию пузырей. Резкое снижение уровня соответствует моменту схлопывания пузыря, а последующее увеличение уровня – времени образования следующего. Медленное снижение уровня совпадает с этапом всплытия пузыря и истечения воды из ёмкости. Отметим, что вода вытекает из ёмкости только на отрезке времени всплытия пузыря, при этом на неё действует напор с высотой столба, сравнимый с диаметром пузыря.

Результаты визуализации расчётного процесса истечения воды из закрытой ёмкости приведены в виде отдельных “кадров”. Видно, что составленная для описания процесса истечения жидкости из закрытой ёмкости математическая модель описывает достаточно правдоподобно реальный процесс в динамике.

На рисунке 2а показан кадр первого этапа истечения – истечения под действием напора исходного столба жидкости, на рисунке 2б – этап прекращения истечения и образования пузыря, на рисунке 2в – этап всплытия пузыря и истечения воды под действием напора, сравнимого по высоте с диаметром отверстия, на рисунке 2г – момент схлопывания пузыря и на рисунке 2д – превращение процесса в циклический (образование нового пузыря).

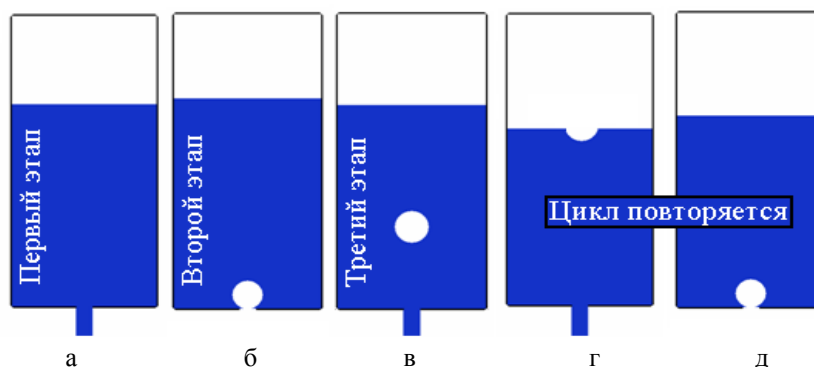


Рисунок 2 – Визуализированные результаты расчетов истечения воды из емкости

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ

Представляют интерес результаты, полученные из анализа математической модели, такие как зависимость диаметра пузырей и частота их образования в динамике процесса снижения уровня воды в ёмкости (рисунок 3а, 3б). Видно, что эти параметры незначительно меняются в процессе. Принимая во внимание, что скорость истечения воды непосредственно зависит от напора, по своей высоте, определяемой отношением $h_n = V_{\text{выз}}/S_0$, видно, что этот напор мало меняется, как и сам размер и частота появления пузыря. Это обстоятельство хорошо коррелируется с характером изменения уровня воды (рисунок 4), близким к линейному. Надо принять во внимание, что, говоря о линейности характера изменения уровня воды, понимается его среднеинтегральное по каждому колебательному циклу положение.

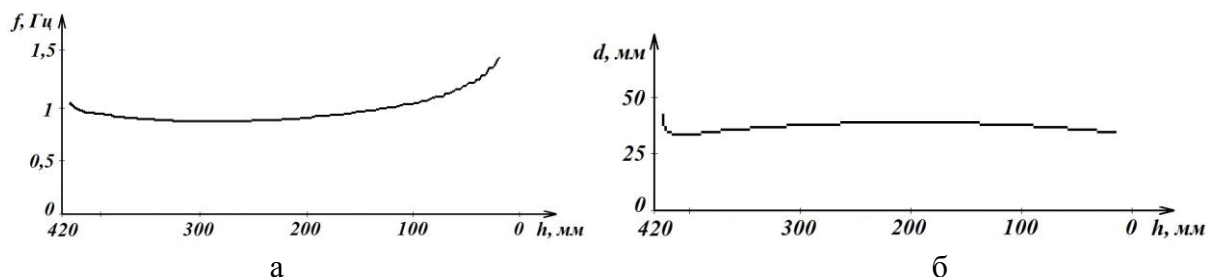


Рисунок 3 – Параметры пузырей в динамике процесса снижения уровня воды
а – частота образования, б – диаметр

Расчетные изменения уровня жидкости в ёмкости на рисунке 4 приведены в двух вариантах: первый – вариант истечения из отверстия в случае замкнутой ёмкости, полученный в данной работе, и второй вариант – в случае открытой ёмкости согласно известным решениям.

При составлении этих графиков колебания уровня воды, заметные на рисунке 1, перестают быть таковыми вследствие масштаба рисунка. Видно существенное качественное и количественное различие между характерами истечения в обоих вариантах; в случае закрытой ёмкости вода вытекает за время в 5 раз медленнее, чем из открытой. Применение методик расчётов истечения жидкости, полученных для открытой ёмкости (например, при расчёте времени опорожнения ёмкости), в нашем случае дают результаты, почти на порядок отличающиеся от реальных.

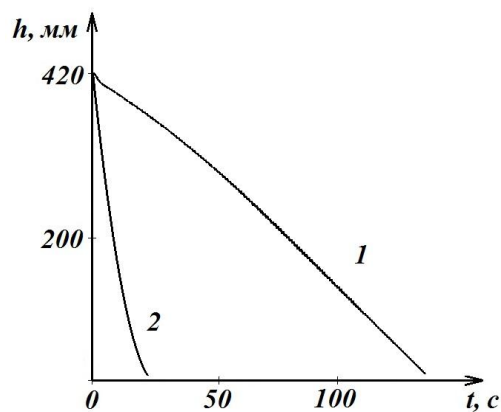


Рисунок 4 – Динамика уровня воды:
1 – при истечении из закрытой емкости;
2 – из открытой емкости

ВЫВОД

Полученные результаты исследований определяют необходимость учёта замкнутости объёма при расчётах истечения из неё в случае повреждения и разработки инженерной методики расчёта, основанной на приведённых результатах исследования.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поландов, Ю.Х. Задача истечения воды из закрытой емкости в случае ее повреждения / Ю.Х. Поландов, С.А. Власенко, А.В. Митрохин // Известия ОрелГТУ. Серия “Строительство и транспорт” №2/18 (543) / ОрелГТУ. – Орел, 2008. С. 30–36.

Поландов Юрий Христофорович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
доктор технических наук, профессор кафедры «Высшая математика»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862)413295
E-mail: polandov@yandex.ru

Бабанков Виталий Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
студент 5 курса ОрелГТУ
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862)413295
E-mail: polandov@yandex.ru

МЕТОД РАСЧЕТА ЭНЕРГИИ АДГЕЗИИ УПРУГИХ ТЕЛ

Представлен метод расчета поверхностной энергии и энергии адгезии упругих тел. В основу положена градиентная модель упругой среды. Характеристики свойств материала определяются через потенциалы нелокальных парного и тройного взаимодействий его частиц. Результаты расчета удовлетворительно соответствуют известным.

Ключевые слова: адгезия, градиентная модель упругой среды, поверхностная энергия, энергия адгезии, потенциал взаимодействия.

The analysis of surface energy and energy of adhesion elastic body is presented. At the heart of this analysis is put the gradient model of elastic medium. Characteristics of material properties are defined through potentials of non-local first-order and triple interactions its particles. Results of calculation correspond with known calculations satisfactorily.

Key words: adhesion, limiting wetting angle, surface tension, gradient model of an elastic medium, surface energy, energy of adhesion, potential of interaction.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многослойные структуры из материалов сложного химического состава (сплавов, химических соединений) находят широкое применение в технике. Из-за сложности проведения опытов по проверке адгезионной прочности, их высокой себестоимости, делать это удобнее всего теоретически с помощью расчета, например, энергии адгезии. Энергия адгезии F_a тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ вдоль поверхности S_a вычисляется по формуле [1]:

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

Вычитаемое в правой части (1) – сумма поверхностных энергий свободных от контакта тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$; уменьшаемое – поверхностная энергия слипшейся системы. Для изотермического обратимого процесса W_p – это изменения свободной энергии $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$, произошедшие при образовании у них поверхности S_a и последующем их объединении вдоль S_a отнесенные к единице ее площади.

Процесс образования элементарного участка свободной поверхности $S = S_f$: $dS = dS_f$ произвольного тела C (совпадающего с $B_{(1)}$ или $B_{(2)}$), или поверхности адгезии двух тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ ($C = B_{(1)} \cup B_{(2)}$) поверхности $S = S_a$: $dS = dS_a$ предлагается рассматривать в два этапа. На первом этапе происходит образование этого участка без изменения структуры приповерхностного слоя. Это соответствует представлениям [2]. На втором этапе, из-за нарушенного равновесия сил, действующих на пограничные частицы со стороны их окружения, происходит деформирование этой структуры [3], изменение профиля поверхности S_f (или S_a) [3, 4]. Это учитывается тем, что на первом этапе изменение свободной энергии dF тела C (или системы тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$)

$$dF = dA - \sigma dT,$$

где A – работа внешних сил;

σ – энтропия;

T – температура, при $T = const$ оказывается равной

$$dF = dA = W_p dS.$$

Предположив мгновенное образование S , можно записать

$$\Delta F = F - F_0 = \int_0^S W_p dS, \quad W_p = \frac{\partial F}{\partial S}. \quad (2)$$

При этом оказывается, что все изменения свободной энергии (2) распределены только по поверхности S . Происходящему на первом этапе соответствуют представления [5, 6].

В данной работе допускается, что на втором этапе, энергия ΔF , распределенная по по-

верхности S , перераспределяется по всему объему V тела C с определенной объемной плотностью w , концентрируясь в основном вблизи S [7, 8] так что:

$$\Delta F = \int_0^S W_p dS = \int_V w dV . \quad (3)$$

(Происходящие при этом деформации можно считать малыми, отмечено в [7], поэтому абсолютным значением изменения объема в данной работе пренебрегается.)

Необходимо отметить, что равенство (3) дает основание для предположения о существовании такого векторного поля $\vec{f} = \vec{f}(\vec{r})$, \vec{r} – радиус-вектор точки в отсчетной конфигурации, что

$$w = \text{div } \vec{f} = \nabla \circ \vec{f} ,$$

где (\circ) – знак свертки (скалярного произведения);

∇ – оператор Гамильтона, при этом

$$W_p = \vec{n} \circ \vec{f} ,$$

где \vec{n} – внешняя единичная нормаль к S .

В этом случае, допустив потенциальность поля $\vec{f}(\vec{r})$

$$\vec{f} = \nabla \Phi ,$$

и вычислив распределение $w = w(\vec{r})$ (при физически обоснованных краевых условиях для Φ) можно найти поле \vec{f} , а затем и распределение W_p вдоль S . Свободная энергия твердого тела складывается из потенциальной энергии решетки, энергии тепловых колебаний атомов, находящихся в ее узлах (энергии фононного газа). Для металлов так же учитывается и энергия электронного газа. Сказанное дает основание полагать упругое твердое тело упругой средой, "накаченное" под определенным давлением фононным газом, а металлы еще и электронным газом. Это давление, очевидно, способно совершать работу на деформациях решетки [9], поэтому должно быть учтено в расчетах поверхностной энергии, энергии адгезии методами механики сплошных сред. Физические методы учитывают это обстоятельство.

МОДЕЛЬ УПРУГОЙ СРЕДЫ

Используется модель, предложенная в [10, 11] основанная на гипотезе о дальнедействующем парном потенциальном взаимодействии частиц сплошной среды. Потенциал считается известным. Через него вычисляются характеристики упругого состояния. В данной работе эта модель дополнена учетом тройного взаимодействия [12, 13].

Допускается, что произвольное тело C получается выделением из бесконечно протяженной изотропной однородной среды Ω . Центр масс произвольной частицы dV в процессе деформации материала тела C перемещается из отсчетного положения \vec{r} в текущее \vec{R} . Перемещение характеризуется вектором $\vec{u} = \vec{u}(\vec{r})$.

Потенциал взаимодействия бесконечно малой частицы dV с ее окружением в теле C с объемом V : $dW = w(\vec{r}) dV$. Причем плотность распределения $w(\vec{r})$ этого потенциала определяется формулой:

$$w(\vec{r}) = \frac{1}{2!} \int_V \Phi^{(2)}(\vec{r}, \vec{R}_1) dV_1 + \frac{1}{3!} \int_V \int_V \Phi^{(3)}(\vec{r}, \vec{R}_1, \vec{R}_2) dV_2 = \frac{1}{2!} \int_V \Psi^{(2)}(\vec{r}, \vec{R}_1) dV_1, \quad (3)$$

где $\Psi_{(j,k)}^{(2)} = \Phi_{(j,k)}^{(2)} + \frac{2!}{3!} \int_{V_{(k)}} \Phi_{(j,k)}^{(3)} dV_{(k)2}$ – обобщенные потенциалы парного взаимодействия частиц тела $B_{(j)}$ с частицами тела $B_{(k)}$ ($j, k = 1, 2$) соответственно.

В выражении (3) $\Phi^{(2)}$ и $\Phi^{(3)}$ – потенциалы парного и тройного взаимодействия частицы dV с частицей dV_1 и с парой частиц dV_1 и dV_2 соответственно.

Задача о равновесии произвольного тела C , ограниченного поверхностью S_f в отсутствии

внешних воздействий – это задача о поиске поля $\vec{u}(\vec{r})$, обеспечивающего минимум функционала

$$W_C = \int_{V_C} w(\vec{r} + \vec{u}(\vec{r})) dV.$$

Если соответствующее поле перемещений $\vec{u}(\vec{r})$ найдено для некоторого тела C , то можно найти его суммарную поверхностную энергию. Для этого оно выделяется в среде Ω сначала мысленно. Его потенциальная энергия W_C^0 при этом определяется равенством:

$$W_C^0 = \int_{V_C} w^0(\vec{r}) dV = \int_{V_C} dV \left[\frac{1}{2!} \int_{\Omega} \Phi^{(2)}(\vec{r}, \vec{r}_1) dV_1 + \frac{1}{3!} \int_{\Omega} dV_1 \int_{\Omega} \Phi^{(3)}(\vec{r}, \vec{r}_1, \vec{r}_2) dV_2 \right].$$

Если часть C выделена из Ω реально, то элементарные частицы, $dV \subset V$, получат перемещение $\vec{u}(\vec{r})$, $\vec{r} \in V_C$, и энергия этой части изменится и станет равна

$$W_C = \int_{V_C} w(\vec{r}) dV = \int_{V_C} dV \left[\frac{1}{2!} \int_{V_C} \Phi^{(2)}(\vec{r}, \vec{R}_1) dV_1 + \frac{1}{3!} \int_{V_C} dV_1 \int_{V_C} \Phi^{(3)}(\vec{r}, \vec{R}_1, \vec{R}_2) dV_2 \right].$$

Изменение энергии $\Delta W_C = W_C - W_C^0$ при условии изотермичности процесса выделения можно рассматривать как полную поверхностную энергию тела C .

Для определения распределения W_C по поверхности S_f используется обычно допущение о том, что плотность распределения $W_p = const$ вдоль S_f .

Пусть $C = B_{(1)} \cup B_{(2)}$ – объединенное тело, состоящее из частей $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$, контактирующих вдоль поверхности S_a , удерживаемых силами адгезии. Опираясь на формулу (3) можно записать выражение для плотности изменения внутренней энергии в каждом из тел $B_{(k)}$, $k = 1, 2$:

$$w_{(k)}(\vec{r}) = \frac{1}{2!} \int_{V_{(1)}} \Psi_{(k,1)}^{(2)}(\vec{r}, \vec{R}_1) dV_{(1)} + \frac{1}{2!} \int_{V_{(2)}} \Psi_{(k,2)}^{(2)}(\vec{r}, \vec{R}_1) dV_{(2)}.$$

Задача об определении полей перемещений их точек: $\vec{u}_{(1)}(\vec{r})$, $\vec{r} \in V_{(1)}$ и $\vec{u}_{(2)}(\vec{r})$, $\vec{r} \in V_{(2)}$, сопрягающихся вдоль S_a , является задачей о поиске минимума функционала энергии объединенного тела

$$W_{(1,2)} = \sum_{k=1}^2 \int_{V_{(k)}} w_{(k)}(\vec{r}) + \vec{u}_{(k)}(\vec{r}) dV_{(k)},$$

при условии отсутствия действия на $B_{(k)}$ внешних сил и свободных внешних границ.

В обоих случаях: $C = B_{(k)}$ или $C = B_{(1)} \cup B_{(2)}$, варьирование производится относительно текущего состояния. Частицы, имеющие радиус-вектор $\vec{R}_{(j)} = \vec{r}_{(j)} + \vec{u}_{(j)}$, приобретают произвольное дополнительное поле перемещений $\delta \vec{u}_{(j)}$. В результате этого величины W_C получают вариацию δW_C . Для полей $\vec{u}_{(j)}$, соответствующих условию равновесия тела C : $\delta W_C = 0$.

Кроме сказанного выше допускается, что:

– парное взаимодействие частиц $dV_{(j)}$ и $dV_{(k)}$, $j, k = 1, 2$, принадлежащих как одному телу ($j = k$) $B_{(j)}$, так и разным телам ($j \neq k$), зависит только от радиус-вектора центра масс частицы $dV_{(k)1}$ относительно центра масс частицы $dV_{(j)}$:

$$\vec{A}_{(j,k)} = \vec{R}_{(k)1} - R_{(j)} = \vec{a}_{(j,k)} + \Delta \vec{u}_{(j,k)}, \quad \vec{a}_{(j,k)} = \vec{r}_{(k)1} - \vec{r}_{(j)};$$

– в отсчетном состоянии, когда $\vec{A}_{(j,k)} = \vec{a}_{(j,k)}$, эта зависимость является зависимостью от $|\vec{a}_{(j,k)}| = a_{(j,k)}$;

– сила действия на частицу $dV_{(j)}$ в этих случаях определяется выражением

$$\vec{F}_{(j,k)} = \frac{1}{2!} \frac{d\Phi_{(j,k)}^{(2)}}{d\vec{A}_{(j,k)}} \approx \vec{F}_{(j,k)} \left\langle \left(\vec{A}_{(j,k)} \right) \right\rangle + \Delta \vec{u}_{(j,k)} \left\langle \left(\vec{A}_{(j,k)} \right) \right\rangle \frac{d\vec{F}_{(j,k)}^{(2)} \left\langle \left(\vec{A}_{(j,k)} \right) \right\rangle}{d\vec{a}_{(j,k)}}; \quad (4)$$

– относительное смещение частиц $dV_{(j)}$ и $dV_{(k)}$ может быть представлено в виде

$$\Delta \vec{u}_{(j,k)} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m!} \frac{d^m \vec{u}_{(j,k)}}{d\vec{r}^m} \overset{m \text{ раз}}{\circ \dots \circ} \vec{a}_{(j,k)}^m, \quad (5)$$

где $\frac{d^m \vec{u}}{d\vec{r}^m} = \nabla^m \vec{u}$ – градиент порядка m вектора \vec{u} ;

∇ – оператор Гамильтона;

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

Считается, что потенциал тройного взаимодействия зависит от взаимного расположения каждой из пар частиц, соответствующих тройке. То есть:

$$\Phi_{(j,k)}^{(3)} = \Phi_{(j,k)}^{(3)} \left\langle \left(\vec{A}_{(j,k)1}, \vec{A}_{(j,i)2} \right) \right\rangle \approx \Phi_{(j,k)}^{(2)} \left\langle \left(\vec{A}_{(j,k)1} \right) \right\rangle \left\langle \left(\vec{A}_{(j,i)2} \right) \right\rangle,$$

где $\vec{A}_{(j,k)1} = \vec{R}_{(k)1} - \vec{R}_{(j)}$, $\vec{A}_{(j,i)2} = \vec{R}_{(i)2} - \vec{R}_{(j)}$;

– что плотность материала $\rho_{(k)} = const$, $k = 1, 2$.

Если C – тело B , или $B_{(1)}$ или $B_{(2)}$, или мысленно выделенная часть бесконечной среды Ω , на которое не действуют внешние силы, то вариация $\delta \vec{u} \left\langle \left(\vec{A} \right) \right\rangle$ поля $\vec{u} \left\langle \left(\vec{A} \right) \right\rangle$ приведет к появлению вариации

$$\begin{aligned} \delta W &= \int_{V_C} \delta w \left\langle \left(\vec{A} \right) \right\rangle dV; \\ \delta w &= \int_{V_C} \left[\frac{1}{2!} \delta \Phi^{(2)} \left\langle \left(\vec{A}_1 \right) \right\rangle + \frac{1}{3!} \int_{V_C} \delta \Phi^{(3)} \left\langle \left(\vec{A}_1, \vec{A}_2 \right) \right\rangle dV_2 \right] dV_1 = \\ &= \int_{V_C} \left[\frac{1}{2!} \left(\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial \vec{A}_1} \right) \circ \delta \left\langle \left(\vec{u}_1 \right) \right\rangle + \int_{V_C} \left[\frac{1}{3!} \left(\frac{\partial \Phi^{(3)}}{\partial \vec{A}_1} \right) \circ \delta \left\langle \left(\vec{u}_1 \right) \right\rangle + \frac{1}{3!} \left(\frac{\partial \Phi^{(3)}}{\partial \vec{A}_2} \right) \circ \delta \left\langle \left(\vec{u}_2 \right) \right\rangle \right] dV_2 \right] dV_1. \quad (6) \end{aligned}$$

Производные $\frac{\partial \Phi^{(3)}}{\partial \vec{A}_1}$ и $\frac{\partial \Phi^{(3)}}{\partial \vec{A}_2}$ имеют вид, совпадающий с (4).

Учет в (6) разложения (5) приводит его к виду

$$\begin{aligned} \delta w_{(1)} &= \left(P_{(1)}^{01} + \left\langle \left(\vec{u} \right) \right\rangle \circ C_{(1)}^{11} + \dots + \left\langle \left(\vec{u} \right) \right\rangle \overset{m+1 \text{ раз}}{\circ \dots \circ} C_{(1)}^{m1} + \dots \right) \circ \delta \left\langle \left(\vec{u} \right) \right\rangle + \dots + \\ &+ \left(P_{(1)}^{0k} + \left\langle \left(\vec{u} \right) \right\rangle \circ C_{(1)}^{1k} + \dots + \left\langle \left(\vec{u} \right) \right\rangle \overset{m+1 \text{ раз}}{\circ \dots \circ} C_{(1)}^{mk} + \dots \right) \overset{k \text{ раз}}{\circ \dots \circ} \delta \left\langle \left(\vec{u}^{k+1} \right) \right\rangle + \dots + \end{aligned}$$

В этой записи:

$$\begin{aligned} P_{(1)}^{0k} &= \frac{1}{2!} \int_{V_{(1)}} \left(\frac{\partial \Phi_{(1)}^{(2)}}{\partial \vec{a}_{(1)}} \vec{a}_{(1)}^k \right) dV_{(1)1} + \frac{1}{2!} \int_{V_{(2)}} \left(\frac{\partial \Phi_{(1,2)}^{(2)}}{\partial \vec{a}_{(1,2)}} \vec{a}_{(1,2)}^k \right) dV_{(2)1} + \\ &+ \frac{1}{3!} \int_{V_{(1)}} \left[\int_{V_{(1)}} \left(\frac{\partial \Phi_{(1,1)1}^{(3)}}{\partial \vec{a}_{(1,1)1}} \vec{a}_{(1,1)1}^k \right) dV_{(1)2} + \int_{V_{(1)}} \left(\frac{\partial \Phi_{(1,1)2}^{(3)}}{\partial \vec{a}_{(1,1)2}} \vec{a}_{(1,1)2}^k \right) dV_{(1)2} \right] dV_{(1)2} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{3!} \int_{V_{(2)}} \left[\int_{V_{(2)}} \left(\frac{\partial \Phi_{(1,2)1}^{(3)}}{\partial \bar{a}_{(1,2)1}} \bar{a}_{(1,2)1}^k \right) dV_{(2)2} + \int_{V_{(2)}} \left(\frac{\partial \Phi_{(1,2)2}^{(3)}}{\partial \bar{a}_{(1,2)2}} \bar{a}_{(1,2)2}^k \right) dV_{(2)2} \right] dV_{(2)1} \\
 C_{(1)}^{mk} = & \frac{1}{2!} \int_{V_{(1)}} \left(\bar{a}_{(1,1)}^m \circ \circ \frac{d^2 \Phi_{(1)}^{(2)}}{d\bar{a}_{(1)}^2} \circ \circ \bar{a}_{(1,1)}^k \right) dV_{(1)} + \frac{1}{2!} \int_{V_{(2)}} \left(\bar{a}_{(1,2)}^m \circ \circ \frac{d^2 \Phi_{(1,2)}^{(2)}}{d\bar{a}_{(2)}^2} \circ \circ \bar{a}_{(1,2)}^k \right) dV_{(2)} + \\
 & + \sum_{p=1}^2 \frac{1}{3!} \int_{V_{(p)}} \left\{ \int_{V_{(p)}} \left(\bar{a}_{(1,p)1}^m \circ \circ \frac{\partial^2 \Phi_{(1,p)}^{(2)}}{\partial \bar{a}_{(1,p)1}^2} \circ \circ \bar{a}_{(1,p)1}^k \right) dV_{(p)2} + \right. \\
 & + \int_{V_{(p)}} \left(\bar{a}_{(1,p)2}^m \circ \circ \frac{\partial^2 \Phi_{(1,p)}^{(2)}}{\partial \bar{a}_{(1,p)1} \partial \bar{a}_{(1,p)2}} \circ \circ \bar{a}_{(1,p)1}^k \right) dV_{(p)2} + \\
 & \left. + \int_{V_{(p)}} \left(\bar{a}_{(1,p)1}^m \circ \circ \frac{\partial^2 \Phi_{(1,p)}^{(3)}}{\partial \bar{a}_{(1,p)1} \partial \bar{a}_{(1,p)2}} \circ \circ \bar{a}_{(1,p)2}^k \right) dV_{(p)2} + \int_{V_{(p)}} \left(\bar{a}_{(1,p)2}^m \circ \circ \frac{\partial^2 \Phi_{(1,p)}^{(3)}}{\partial \bar{a}_{(1,p)2}^2} \circ \circ \bar{a}_{(1,p)}^k \right) dV_{(p)2} \right\} dV_{(p)1},
 \end{aligned}$$

где $(^T)$ – символ транспонирования; $\Phi_{(j,k)}^{(m)}$ – потенциал одновременного взаимодействия, $m = 2$ или $m = 3$ частиц, принадлежащих $B_{(j)}$ и $B_{(k)}$. Если $C \equiv B_{(1)}$, то $\Phi_{(1,2)}^{(2)} = 0$

Тензоры $P_{(q)}^{0(k)}$, $q = 1, 2$ – характеризуют начальное напряженное состояние в телах $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$, вызванное потенциальным взаимодействием частиц их материалов. Тензоры $C_{(1)}^{mk}$ характеризуют механические свойства рассматриваемых сред.

Переход к локальному описанию, осуществленный за счет введения представленных выше допущений, означает переход от прямого учета взаимодействия частиц среды, расположенных на произвольно большом расстоянии друг от друга, посредством классических сил – векторов, совершающих работу на относительных перемещениях этих точек, к описанию этого взаимодействия посредством обобщенных сил – последовательности тензоров \mathbb{K}^m , где

$$P^m = P^{0m} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\mathbb{K}^k \bar{u} \right) \circ C^{km}, \tag{7}$$

характеризующих напряженное состояние в бесконечно малой окрестности точки своего определения. Эти тензоры совершают работу на обобщенных перемещениях, которыми являются члены последовательности градиентов $\mathbb{K}^m \bar{u}$, определенной в той же точке, характеризующей деформированное состояние в бесконечно малой ее окрестности.

Уравнения равновесия представлены в работе [10] и для случая отсутствия внешних воздействий для каждого из тел $B_{(j)}$ имеют вид:

$$\nabla \circ \left(\mathbb{P}_{(j)}^1 - \nabla \circ \left(\mathbb{P}_{(j)}^2 - \nabla \circ \left(\mathbb{P}_{(j)}^3 - \dots \right) \right) \right) = 0, \quad \bar{r} \in B_{(j)}; \tag{8}$$

На гладких границах $S_{(j)} = S_{(j)0} \cup S_{(j)\infty}$ тел $B_{(j)}$, учитывается, что у каждого из тел часть границы $S_{(j)\infty}$ – свободна от внешних воздействий, а на части $S_{(j)0}$ тела $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ находятся в адгезионном контакте. В результате для $\bar{r} \in S_{(j)\infty}$:

$$\begin{aligned}
 & \bar{n} \circ \left(\mathbb{P}_{(j)}^1 - \nabla \circ \left(\mathbb{P}_{(j)}^2 - \dots \right) \right) \\
 & - \nabla_S \circ \left(\mathbb{K} \circ \left(\mathbb{P}_{(j)}^2 - \nabla \circ \left(\mathbb{P}_{(j)}^3 - \dots \right) \right) \nabla_S \circ \left(\mathbb{K}_S \circ \left(\mathbb{P}_{(j)}^3 - \dots \right) \right) \right) = 0, \quad \bar{r} \in S_{(j)\infty}; \tag{9} \\
 & \bar{n} \circ \left(\mathbb{P}_{(j)}^2 - \nabla \circ \left(\mathbb{P}_{(j)}^3 - \dots \right) \right) \nabla_S \circ \left(\mathbb{K} \circ \left(\mathbb{P}_{(j)}^3 - \dots \right) \right) = 0, \\
 & \dots
 \end{aligned}$$

Вместе с равенством (7) равенство (8) и (9) являются условиями обращения в ноль вариации δW_C .

В выражениях (8) и (9) ∇_S – оператор Гамильтона, определенный на $S_{(j)}$ поверхности; \vec{n} – единичная нормаль к соответствующей граничной поверхности.

На основании соответствующих физических рассуждений на поверхности $S_{(1)0} = S_{(2)0} = S_0$ задаются условия сопряжения полей каждого из обобщенных перемещений $\nabla^m \vec{u}_{(j)}$ в виде их линейных равенств с тензорными коэффициентами в виде:

$$A_{(1,2)m}^0 + A_{(1)m} \circ \dots \circ \left(\nabla^m \vec{u}_{(1)} \right) + A_{(2)m} \circ \dots \circ \left(\nabla^m \vec{u}_{(2)} \right) = 0. \quad (10)$$

Исходя из вариационных условий равновесия тела B в целом и каждой из его частей можно получить, что на поверхности S_a должны выполняться равенства

$$\vec{n}_{(1)a} \circ P^1 \circ \delta \vec{u}_{(1)} + \vec{n}_{(2)a} \circ P_{(2)}^1 \circ \delta \vec{u}_{(2)} = 0,$$

$$\left(\nabla_{(1)a} \vec{n}_{(1)a} \right) \circ P_{(1)}^2 \circ \delta \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{n}_{(1)a}} \right) + \left(\nabla_{(2)a} \vec{n}_{(2)a} \right) \circ P_{(2)}^2 \circ \delta \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{n}_{(2)a}} \right) = 0.$$

На основании (10) можно получить условия сопряжения полей пар тензоров напряжений $P_{(1)}^m$ и $P_{(2)}^m$ для каждого значения m .

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Соотношение (7) мало отличается от аналогичных, построенных для градиентных моделей линейно упругих сред различных порядков [5, 14, 15]. Существенное отличие предлагаемой модели от известных состоит в способе оценки тензоров P^{0m} и C^{km} , а именно, вместо экспериментального определения компонент тензоров предлагается использовать потенциалы взаимодействия элементарных частиц среды $\Phi_{(j,k)}^{(2)}$ и $\Phi_{(j,k)}^{(3)}$ в виде [16]:

$$\Phi_{(j,k)}^{(2)} = D_{(j,k)} \left(e^{-2\beta_{(j,k)} a_{(j,k)}} - 2e^{-\beta_{(j,k)} a_{(j,k)}} \right), \quad (j = k \text{ или } j \neq k); \quad (11)$$

$$\Phi_{(j,k)}^{(3)} = \Phi_{(k,k)}^{(3)} =$$

$$E_{(j,k)} \left(e^{-2\beta_{(j,k)1} a_{(j,k)1}} - 2e^{-\beta_{(j,k)1} a_{(j,k)1}} \right) \left(e^{-2\beta_{(j,k)2} a_{(j,k)2}} - 2e^{-\beta_{(j,k)2} a_{(j,k)2}} \right), \quad (j = k); \quad (12)$$

$$\Phi_{(j,k)}^{(3)} = 0, \quad (j \neq k),$$

где $D_{(j,k)}$ и $E_{(j,k)}$ – параметры;

$\beta_{(j,k)}$ – коэффициент пропорциональности,

$a_{(j,k)}$ – расстояние между взаимодействующими частицами.

Для определения $D_{(j,k)}$ и $E_{(j,k)}$ получена система [12, 16] связывающая их значения с коэффициентами Ламэ μ и λ :

$$\left(\frac{16\pi}{15\beta_{(j,k)}^3} \right) D_{(j,k)} + \left(\frac{185\pi^2}{\beta_{(j,k)}^6} \right) E_{(j,k)} = \lambda; \quad \left(\frac{16\pi}{15\beta_{(j,k)}^3} \right) D_{(j,k)} + \left(\frac{120\pi^2}{\beta_{(j,k)}^6} \right) E_{(j,k)} = \mu.$$

В качестве дополнительного уравнения использован известный факт нелинейности акустической ветви дисперсионного закона [17]. Ее описание в параболическом приближении приводит к формуле [18]

$$\beta_{(j,k)} \approx \frac{45}{4} \cdot \frac{1}{l\sqrt{1/12}} = \frac{45}{4} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{l} = \frac{45\sqrt{3}}{2l},$$

где $l = 1/\sqrt[3]{n}$,

n – число атомов вещества в единице объема.

Потенциалы парного и тройного взаимодействий частиц разных материалов принима-

лись в той же форме (11) – (12), что и для однородной среды. Параметры $D_{(j,k)}$, $\beta_{(j,k)}$ при $j \neq k$ предлагается определить с помощью аппроксимации на ее основе известного потенциала дисперсионного взаимодействия двух частиц [17]:

$$W_d = -\frac{A}{a_{(j,k)}^6}, \quad (13)$$

где $a_{(j,k)}$ – расстояние между частицами;

A – постоянная Гамакера.

Для этого соотношение (13) преобразуется к виду

$$W_d = -\frac{An_{(1)}n_{(2)}}{a_{(j,k)}^6/l^*}, \quad l^* = \frac{1}{\sqrt[6]{n_{(j)}n_{(k)}}}.$$

В $dV_{(j)}$ содержится $n_{(j)}dV_{(j)}$ частиц, а в $dV_{(k)}$ – $n_{(k)}dV_{(k)}$ частиц. Поэтому потенциал взаимодействия $dV_{(j)}$ и $dV_{(k)}$, отнесенный к единицам объема этих частиц можно записать в виде:

$$\Phi_{(j,k)}^{(2)*} = -\frac{An_{(j)}^2n_{(k)}^2}{a_{(j,k)}^6/l^*}.$$

Функция $(a_{(j,k)}^6/l^*)^{-1}$ заменена на $(-2\beta a_{(j,k)} - 2e^{-\beta a_{(j,k)}})$ из условия о том, что на участке $a_{(j,k)} \in [l, \infty]$ площади под их графиками совпадают. Потенциал примет вид:

$$\Phi_{(j,k)}^{(2)} = D_{(j,k)} (-2\beta a_{(j,k)} - 2e^{-\beta a_{(j,k)}}),$$

где $D_{(j,k)} = -An_{(1)}^2n_{(2)}^2$.

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

Условия сопряжения полей перемещений и их градиентов на поверхности S_a :

$$\vec{u}_{(1)} - \vec{u}_{(2)} = \vec{0}; \quad \vec{n}_{(1)} \circ \text{grad} \vec{u}_{(1)} - \vec{n}_{(2)} \circ \text{grad} \vec{u}_{(2)} = \vec{0}.$$

Этим условиям отвечают условия сопряжения полей напряжений:

$$\vec{n}_{(1)} \circ P_{(1)}^1 + \vec{n}_{(2)} \circ P_{(2)}^1 = \vec{0}; \quad \vec{n}_{(1)} \circ P_{(1)}^2 = \vec{n}_{(2)} \circ P_{(2)}^2.$$

Кроме выше изложенного, полагается, что одна из точек поверхности S_a неподвижна. Тела $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ считаются полубесконечными и в отсчетном состоянии занимающими области:

$$\begin{aligned} B_{(1)}: & 0 \leq x_1 \equiv x < +\infty; & -\infty < x_2, x_3 < +\infty; \\ B_{(2)}: & -\infty < x_1 \equiv x \leq 0; & -\infty < x_2, x_3 < +\infty; \\ S_a: & x = 0; & -\infty < x_2, x_3 < +\infty, \end{aligned}$$

определенными в прямоугольной декартовой системе координат $Ox_1x_2x_3$. Неподвижной считается точка $O(0, 0, 0) \in S_a$. Процесс деформации является одномерным, развивающимся вдоль координатной линии Ox , так что

$$u_{(j)1} = u_{(j)2} = u_{(j)3} = 0.$$

При $x \rightarrow \pm\infty$ напряженное состояние, вызванное деформациями как в $B_{(1)}$, так и в $B_{(2)}$ исчезает. Условие обеспечивается требованием:

$$\frac{\partial u_{(i)}}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial^2 u_{(i)}}{\partial x^2} = 0 \quad \text{при } x \rightarrow \pm\infty.$$

В соответствии с [10] до тех пор, пока речь идет о колебаниях, кристалл можно рассматривать как фононный газ, который может оказывать давление. Его величина P_{fn} определяется выражением

$$P_{fn} = 9nk\gamma\theta_D + 3nkT\gamma \left[1 - 3\frac{\theta_D}{T} + \frac{1}{20} \left(\frac{\theta_D}{T} \right)^2 \right],$$

где n – число частиц в единице объема;

k – постоянная Больцмана;

γ – постоянная Грюнаизена.

Наряду с этой добавкой к внутреннему давлению, обусловленному потенциальным взаимодействием частиц и характеризуемым тензором P^{01} в металлах существенна добавка P_e , вызванная электронным газом [19]:

$$P_e = \frac{2n_e\mu_0}{5} \left[1 + \frac{5}{12} \left(\frac{\pi kT}{\mu_0} \right)^2 \right],$$

где μ_0 – энергия Ферми,

n_e – число свободных электронов в единице объема.

Зависимость $n_e(x)$ предполагается известной. В качестве распределения $n_e(x)$ можно принять распределение, аналогичное тому, которое использовалось в работе [7] в качестве пробного:

$$n_e(x) = n_0 \left[1 - \frac{1}{2} \exp(-\beta x) \right],$$

где β – параметр, определяемый ранее изложенными методами;

n_0 – значение n вдали от граничной поверхности: $n_0 = n(\infty)$.

Введенная система гипотез позволяет рассчитать распределение значений упругих характеристик в приповерхностных слоях, найти решение уравнений равновесия в перемещениях, вычислить значения поверхностной энергии ряда простых материалов и сопоставить найденные значения с имеющимися в справочной литературе [20] данными.

Результаты расчетов поверхностной энергии некоторых материалов практически повторяют результаты представленные в [21], например, для *Cr* расчетное значение $W_p = 3,87 \text{ Дж/м}^2$, представленное в [21] – $3,485 \text{ Дж/м}^2$, в то время как известное справочное значение [20] $4,72 \text{ Дж/м}^2$. Выяснилось, что соотношение упругой, фоновой и электронной "составляющих" поверхностной энергии ориентировочно определяется пропорцией 1:0,1:1,5. Это косвенно соответствует работе [9]. Доля учета трехчастичного взаимодействия определяется разностью истинного значения коэффициента Пуассона с соответствующим двухчастичному взаимодействию коэффициентом $\nu = 0,25$. Результаты расчета энергии адгезии сопоставлялись с [22]. Результаты сравнения аналогичны. В [22] для пар *Cu-Al*, *Fe-Cu* и *Cr-Fe* получено: $F_a = 2,75; 4,00; 4,85 \text{ Дж/м}^2$. Предложенный метод позволил получить следующие значения энергии адгезии для данных пар: $F_a = 2,78; 3,8; 5,06 \text{ Дж/м}^2$. Видно, что соответствие удовлетворительное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель использует для построения методов расчета поверхностной энергии и энергии адгезии феноменологический подход, позволяющий не учитывать детально взаимодействие ядер, ионов, электронов, атомов при расчете контактного взаимодействия, опирающийся на гипотезу сплошности рассматриваемых сред. В расчетах учитывается нелокальное потенциальное взаимодействие их элементарных частиц. Для определения параметров потенциала предложено использовать феноменологические характеристики однородного состояния сред: число частиц в единице объема, параметры Ламэ (или модуль Юнга и модуль сдвига). Учтено так же давление фоновый газа и электронного газа (в случае металлов). Учет внутреннего давления первого, существенно зависящего от температуры, а также зависимости от нее среднего межатомного расстояния, позволяет найти температурные зависимости поверхностной энергии и энергии адгезии, столь важные для практического применения результатов данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физический энциклопедический словарь [Текст]. – т. 1. – М.: Советская энциклопедия, 1960. – 664 с.
2. Ландау, Л. Д. Статистическая физика [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, Т. 5, 1976. –

3. Киселев, В. Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках [Текст] / В. Ф. Киселев. – М.: Наука, 1970. – 400 с.
4. Горелик, С. С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков [Текст] / С. С. Горелик. – М.: Металлургия, 1988. – 576 с.
5. Лурье, С. А. Теория сред с сохраняющимися дислокациями. Частные случаи: Среды Коссера и Аэро – Кувшинского, пористые среды, среды с "двойникованием" [Текст] / С. А. Лурье // Современные проблемы механики гетерогенных сред. – ИПРИМ РАН, 2005. – С. 235 – 267.
6. Работнов, Ю. Н. Введение в механику разрушения [Текст] / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
7. Партенский, М. Б. Самосогласованная электронная теория металлической поверхности [Текст] / М. Б. Партенский // Успехи физических наук, 1979. – Т. 128. – Вып. 1. – С. 69 – 106.
8. Мамонова, М. В. Расчет работы выхода металлов в рамках метода функционала плотности [Текст] / М. В. Мамонова, В. В. Прудников // Вестник Омского государственного университета, 1998, Вып. 1. - С. 22-25.
9. Конторович, В. М. Динамические уравнения теории упругости в металлах [Текст] / В. М. Конторович // Успехи физических наук. 1984, т. 142, в. 2. – С. 265 – 305.
10. 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. Бровко. - М.: Ленанд, 2006. – С. 271 – 282.
11. Shorkin, V. Theory of the elasticity of the materials of the second order [Текст] / V. Shorkin, V. Gordon // High Performance Structures and Materials III. Editor: C.A. Brebbia. Wessex Institute of Technology, UK. WIT Press, 2006. – P. 581 – 589.
12. 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.
13. Азаров, А. С. Нелокальное взаимодействие твердых материалов [Текст] / А. С. Азаров, Л. Ю. Фроленкова, В. С. Шоркин // Физика прочности и пластичности материалов: Труды XVII Международной конференции (Самара, 23 – 25 июня 2009 г.). Том II. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009. – С. 112 – 116.
14. Тупин, Р. А. Теория упругости, учитывающая моментные напряжения [Текст] / Р. А. Тупин. – М.: Механика. Сборник переводов, 1965. – № 3. – С. 113 – 140.
15. Ерофеев, В. И. Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой [Текст] / В. И. Ерофеев. – М.: МГУ, 1999. – 328 с.
16. Фроленкова, Л. Ю. Методика расчета энергии адгезии с учетом тройного взаимодействия частиц среды [Текст] / Л. Ю. Фроленкова [Текст] // Известие ОрелГТУ, серия "Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии", № 4, 2009. – С. 22 – 26
17. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела [Текст] / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. – 792с.
18. 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.
19. Жирифалько, Л. Статистическая физика твердого тела [Текст] / Л. Жирифалько. – М.: Мир, 1975. – 384 с.
20. Свойства элементов. Физические свойства: Справочник [Текст] / Е. Б. Самсонов. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
21. Шоркин, В. С. Расчет адгезионной прочности соединения твердых тел в рамках теории упругости [Текст] / Шоркин В. С., Фроленкова Л. Ю. // Сборник трудов 47 Международной конференции "Актуальные проблемы прочности". – Н.-Новгород, 2008. – С. 93 – 95.
22. Вакилов, А. Н. Адгезия металлов и полупроводников в рамках диэлектрического формализма [Текст] / А. Н. Вакилов, М. В. Мамонова, В. В. Прудников // Физика твердого тела, 1997. – Т. 39. № 6. – С. 964 – 967.

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

Шоркин Владимир Сергеевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой "Физика"
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-44

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА

УДК 621.914

С.К. АМБРОСИМОВ, А.Н. БОЛЬШАКОВ

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФРЕЗ ЗА СЧЁТ НЕЛИНЕЙНОГО ОБКАТА В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

В статье рассмотрены вопросы производительности различных методов фрезерования сложных поверхностей. Доказано, что при обработке выпуклых криволинейных поверхностей торцовыми фрезами достигается максимальная производительность обработки.

Ключевые слова: методы фрезерования, сложные поверхности, попутное фрезерование, встречное фрезерование.

In this article is conceded different milling methods productivity of complicate convex surface treatment. Theoretical research proved that milling process productivity is increased for turn round methods.

Key words: methods of milling, complex surfaces, passing milling, counter milling.

Существует два способа фрезерования, определяемые направлением движения заготовки относительно инструмента. Их различие заключается в условиях входа и выхода зубьев фрезы из зоны резания. Попутное фрезерование (рисунок 1 а) или фрезерование по подаче – это способ, при котором направление движения заготовки и вектор скорости резания совпадают.

При этом толщина стружки на входе зуба в зону резания максимальна и уменьшается до нулевого значения на выходе. Встречное фрезерование (рисунок 1 б), иногда его называют традиционным, наблюдается, когда скорость резания и движение подачи заготовки направлены в противоположные стороны. При врезании толщина стружки равна нулю, на выходе – максимальна.

В случае встречного фрезерования, когда пластина начинает работу со стружкой нулевой толщины, возникают высокие силы трения, «отжимающие» фрезу и заготовку друг от друга. В начальный момент врезания зуба процесс резания больше напоминает выглаживание, с сопутствующими ему высокими температурами и повышенным трением. Зачастую это грозит нежелательным упрочнением поверхностного слоя детали.

При попутном фрезеровании условия входа пластины в зону резания более благоприятные. Удаётся избежать высоких температур в зоне резания и минимизировать склонность материала заготовки к упрочнению. Большая толщина стружки является в данном случае преимуществом. Силы резания прижимают заготовку к столу станка, а пластины в гнезда корпуса, способствуя их надёжному креплению.

В процессе фрезерования стружка налипает на режущую кромку и препятствует её работе в следующий момент врезания. При встречном фрезеровании это может привести к заклиниванию стружки между пластиной и заготовкой и соответственно, к повреждению пластины. Попутное фрезерование позволяет избежать подобных ситуаций.

Попутное фрезерование является предпочтительным при условии, что жёсткость оборудования, крепления и сам обрабатываемый материал позволяют применять данный метод.

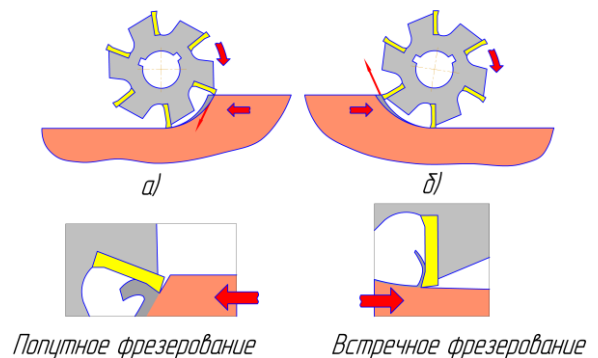


Рисунок 1 – Способы фрезерования, определяемые направлением движения заготовки относительно инструмента
а – попутное фрезерование;
б – встречное фрезерование

В то же время, процесс попутного фрезерования сопряжён с определёнными трудностями. Силы резания стремятся затянуть фрезу на обрабатываемый припуск и прижать заготовку. Поскольку направление скорости резания и подачи совпадают, требуется безззорный привод в механизме подачи стола или заготовки. В противном случае это приведёт к «подрыву» - внезапному увеличению подачи на зуб, что чревато поломкой инструмента. В случае если есть опасность вибраций, попутное фрезерование более благоприятно.

Толстая стружка на выходе приводит к снижению срока службы инструмента и может вызвать его резкое разрушение. Можно заметить, что если программа предусматривает врезание в заготовку по прямой, толстая стружка образуется, пока фреза полностью не войдёт в деталь. В результате ресурс инструмента интенсивно снижается, и для обеспечения приемлемого срока службы необходимо будет снизить скорость подачи для всего процесса (рисунок 2а).

Существует два способа решения этой распространённой проблемы, позволяющие применять оптимальную скорость подачи в период врезания фрезы в заготовку.

1) Программирование на врезание по прямой, но со сниженной на 50% скоростью подачи, пока фреза полностью не войдёт в заготовку.

2) Врезание по кривой с вращением по часовой стрелке (вращение против часовой стрелки не помогает решить проблему образования толстой стружки (рисунок 2б).

Можно заметить, что при врезании по кривой толщина стружки на выходе всегда нулевая, что по данным Sandvik Coromant [1] позволяет применять высокую скорость подачи и увеличивает срок службы инструмента.

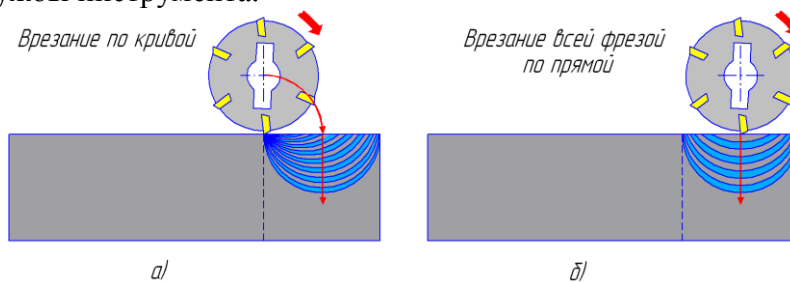
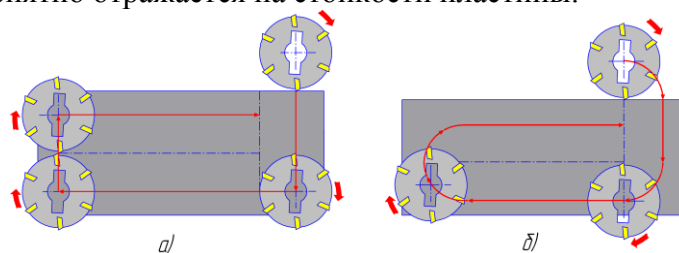


Рисунок 2 – Траектория врезания фрезы в заготовку

При фрезеровании с выходом пластин фрезы из зоны резания наблюдается то же явление, что и при врезании фрезы в заготовку. Для того чтобы не уменьшать скорость резания при переходе фрезы на следующую строку (при фрезеровании плоскости), траектория движения фрезы при переходе на соседнюю строку представляет собой кривую второго порядка (рисунок 3б). При этом стружка на выходе пластины из зоны резания имеет минимальную толщину, что благоприятно отражается на стойкости пластины.



**Рисунок 3 – Траектория движения фрезы:
а – без обвода углов; б – с обводом углов**

При движении фрезы по прямолинейной траектории с выходом её из зоны резания наблюдается более толстая стружка, чем при движении фрезы по криволинейной траектории (рисунок 3б), что приводит к снижению стойкости фрезы.

Приведённые выше примеры и мероприятия способствуют увеличению стойкости инструмента, но износ пластины по-прежнему сконцентрирован на её вершине. Для более равномерного износа режущей пластины, инструменту придают движение обката режущей кромки по обрабатываемой поверхности.

Неизученными или малоизученными являются методы линейного или нелинейного обката при которых производящая поверхность инструмента перекачивается по номинальной поверхности детали [2, 3] обеспечивая последовательный бегущий контакт режущей кромки с поверхностью резания. Предполагается, что смещение вершины режущей кромки и периодическая замена участков главной режущей кромки на вспомогательную и наоборот должны значительно повысить стойкость инструмента.

Перспективным является метод обработки сложных фасонных поверхностей с движением обката, который осуществляют торцевой фрезой с плоской производящей поверхностью.

Инструменту сообщают два одновременных поступательных нелинейно-согласованных движения формообразования и вращательное движение подачи.

Обработку производят на 4-координатных многоцелевых станках с ЧПУ, с непрерывно осуществляемым вращательным движением стола.

Фрезе сообщают главное движение ω_v , подводят до касания с заготовкой, затем согласуют движения поступательных подач таким образом, чтобы осуществлялось радиальное врезание в заготовку (рисунок 4).

После врезания инструмента на необходимую глубину δ , осуществляют согласованное движение с поступательными подачами S_z , S_y и вращательной ω_x , таким образом, чтобы режущая кромка твердосплавной пластины, находящиеся в зоне резания перекачивалась по обрабатываемому контуру. При этом вращательная подача ω_x является мгновенным вращением инструмента относительно оси Ox , принадлежащей системе координат инструмента (рисунок 5)

После врезания и придания необходимого взаимного расположения инструмента и заготовки, начинается основная обработка с движением обката. При этом инструмент осуществляет движение обката за счёт согласования движений подач S_z , S_y и ω_x .

Движение обката состоит из двух частей: прямого обката и обратного. Движение прямого обката начинается, когда твердосплавная пластина касается обработанного участка профиля точкой 1 и заканчивается когда твердосплавная пластина касается обработанного участка профиля точкой 2 (рисунок 6).

Движение обратного обката начинается, когда закончено движение прямого обката и твердосплавная пластина касается обработанного участка профиля точкой 2 и заканчивается когда твердосплавная пластина касается обработанного участка профиля точкой 1, после чего снова начинается движение прямого обката.

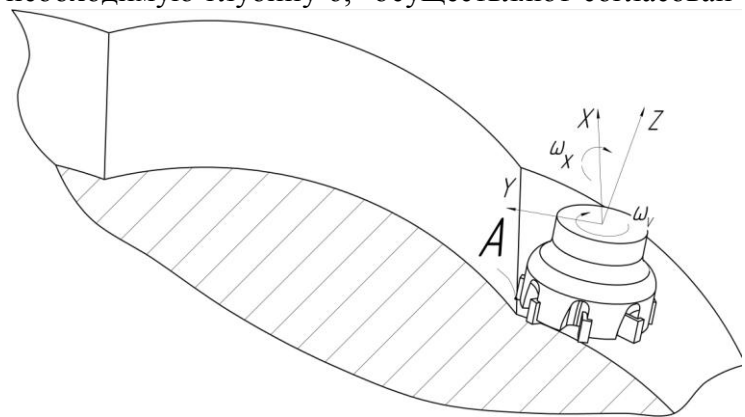


Рисунок 4 – Первая стадия обработки фасонной поверхности инструментом с плоской производящей поверхностью методом обката

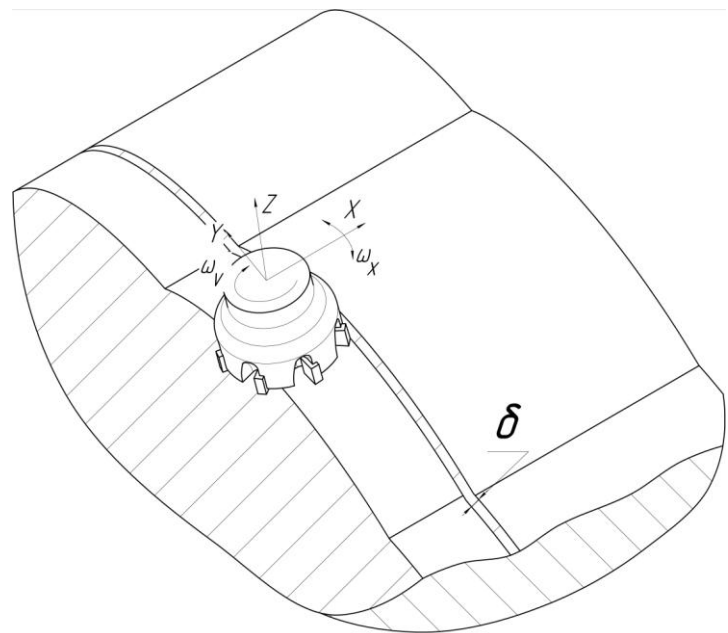


Рисунок 5 – Стадия основной обработки фасонной поверхности инструментом с плоской производящей поверхностью методом обката

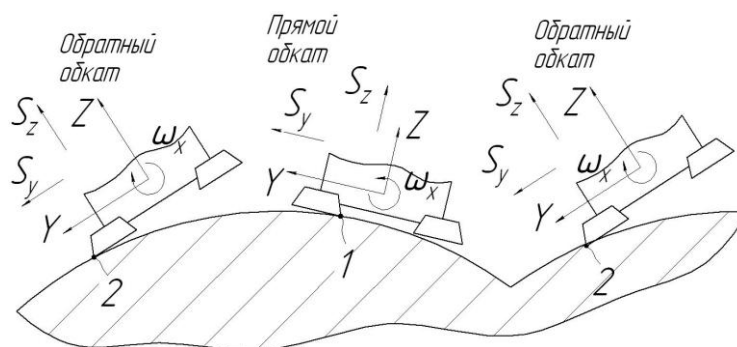


Рисунок 6 – Схема прямого и обратного обкатов

Для оценки преимуществ метода торцевого фрезерования фасонных поверхностей проведен сравнительный анализ производительности.

Рассмотрим в качестве примера чистовую обработку наружной выпуклой поверхности с радиусом кривизны 200 мм инструментом с плоской производящей поверхностью методом обката (первый способ), инструментом с цилиндрической производящей поверхностью (второй способ), инструментом со сферической производящей поверхностью (третий способ), инструментом с комбинированным профилем (четвёртый способ).

Первый способ - чистовая обработка торцевой фрезой методом обката (рисунок 7).

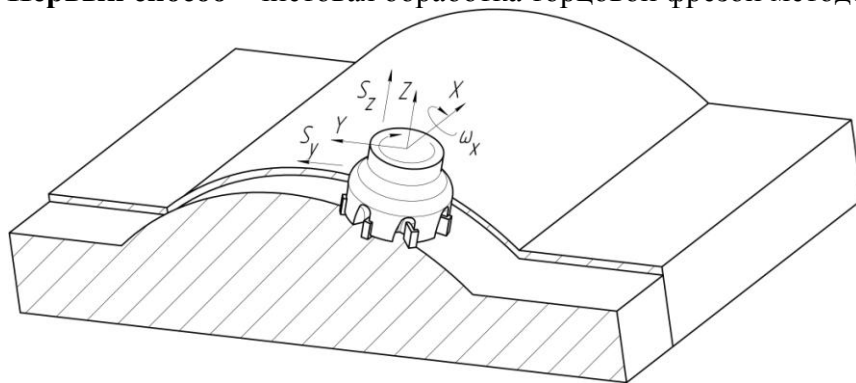


Рисунок 7 – Схема обработки торцевой фрезой методом обката

Используемый инструмент – фреза торцевая CoroMill 245 [1]

Материал режущей части фрезы – твёрдый сплав.

Глубина резания $t = 1$ мм, (основным условием является равенство припусков t под чистовую обработку во всех сравниваемых способах), Скорость резания $v_{рез} = 285$ м/мин [1]

Частота вращения инстру-

мента во всех сравниваемых способах определяется по формуле:

$$n = \frac{V_{рез} \cdot 1000}{\pi \cdot D},$$

где n – частота вращения инструмента;

$V_{рез}$ – скорость резания;

D – максимальный диаметр инструмента участвующий в обработке.

Для исследования формы и объёма срезаемого слоя были рассмотрены два последовательных положения зубьев инструмента в программе КОМПАС–3D V9.

Объем снимаемого материала можно представить для всех исследуемых методов, как сумму объемов отдельных срезаемых стружек. Расчет объемов срезаемых стружек производится для всех методов обработки в программе КОМПАС–3D V9.

Удельная производительность во всех сравниваемых способах определяется по формуле: $q = V_i \cdot z \cdot n$ [см³/мин].

Где V_i – объём единичной снимаемой стружки [мм³], z – число зубьев фрезы, n – частота вращения фрезы [мин⁻¹].

Второй способ – чистовая обработка инструментом со сферическим концом (рисунок 8).

Используемый инструмент – фреза CoroMill со сферическим концом для чистовой обработки 216F [1]. Материал режущей части фрезы – твёрдый сплав. Скорость резания $v_{рез} = 260$ м/мин [1].

Значение диаметра D определяется по формуле:

$$D = 2 \cdot \sqrt{D' \cdot t - t^2},$$

где D' - диаметр инструмента.
 t - глубина резания.

Данная формула выведена на основании взаимного расположения инструмента и обрабатываемой заготовки (рисунок 9).

Третий способ - чистовая обработка цилиндрической фрезой методом обката (рисунок 10). Метод обработки осуществляется инструментом с цилиндрической производящей поверхностью, например, цилиндрической фрезой с движением обката фрезы с проскальзыванием.

Используемый инструмент – фреза цилиндрическая ГОСТ 29092 – 91 [4]. Материал режущей части фрезы – быстрорежущая сталь Р6М5. Скорость резания $v_{рез} = 40$ м/мин.

Четвёртый способ - чистовая обработка угловой двухсторонней фрезой (рисунок 11)

Используемый инструмент – фреза угловая двухсторонняя ГОСТ 501801 – 92 [4].

Материал режущей части фрезы – быстрорежущая сталь Р6М5. Скорость резания $v_{рез} = 40$ м/мин.

На рис. 12 представлены графики удельной производительности для инструментов с различными производящими поверхностями и различных кинематических схем фрезерования. Подача на зуб, число зубьев и материал режущей части инструмента различны и соответствуют типу инструмента и типу обработки.

Удельная производительность находится в прямо пропорциональной зависимости от числа зубьев инструмента, от его диаметра, частоты вращения и от объёма срезаемой стружки одним зубом. Это видно из формулы определения производительности $q = V_i \cdot z \cdot n$. Объём срезаемой стружки одним зубом зависит от подачи инструмента на зуб, от глубины резания (величины снимаемого припуска), от радиуса кривизны обрабатываемой фасонной поверхности и от формы производящей поверхности.

Удельная производительность при применении торцевой фрезы при чистовой обработке выпуклых фасонных поверхностей выше, чем при обработке любой другой фрезой, рассмотренной выше.

Такой эффект объясняется тем, что твёрдый сплав, используемый в торцевых фрезах, позволяет достигать большей скорости резания по сравнению с быстрорежущей сталью, а следовательно и большей частоты вращения, а так же позволяет уве-

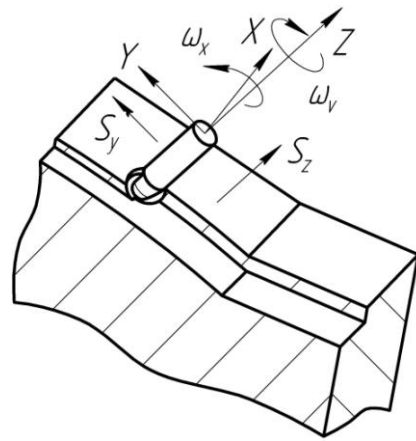


Рисунок 8 – Схема обработки фрезой со сферическим концом

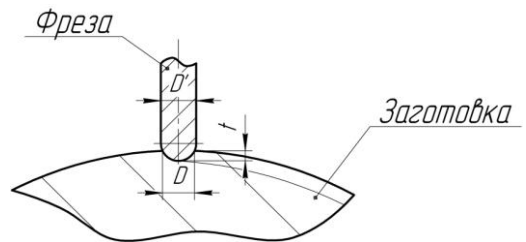


Рисунок – 9 Схема расположения фрезы со сферическим концом относительно заготовки

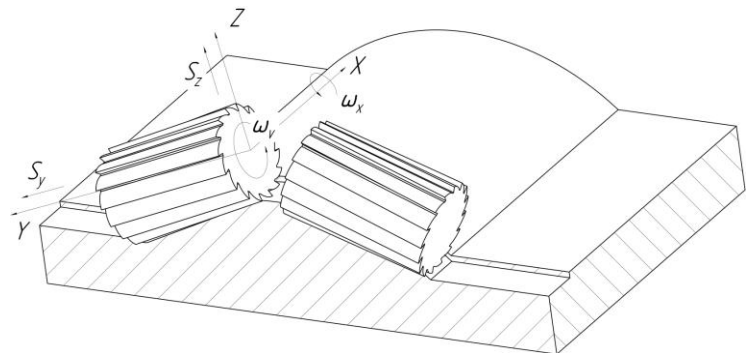


Рисунок – 10 Схема обработки цилиндрической фрезой

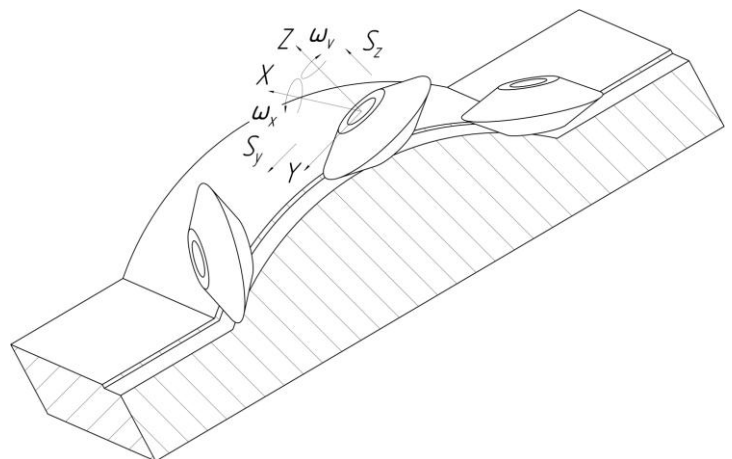


Рисунок – 11 Схема обработки угловой двухсторонней фрезой

личить подачу инструмента на зуб.

ВЫВОДЫ

Предлагаемый способ позволяет расширить технологические возможности обработки элементов сложнопрофильных деталей типа кулачков, пуансонов, фасонных поверхностей знаков универсальным инструментом с плоской производящей поверхностью на станках с ЧПУ, а также повысить качество обрабатываемой поверхности за счёт уменьшения действительных передних и задних углов при косоугольном резании. И увеличить стойкость инструмента за счёт «бегущего» контакта между твердосплавной пластиной и обрабатываемым профилем и снижения вероятности образования проточки, которая образуется на твердосплавной пластине при черновой обработке с постоянной скоростью резания в зоне пересечения обрабатываемой поверхности с главной режущей кромкой.

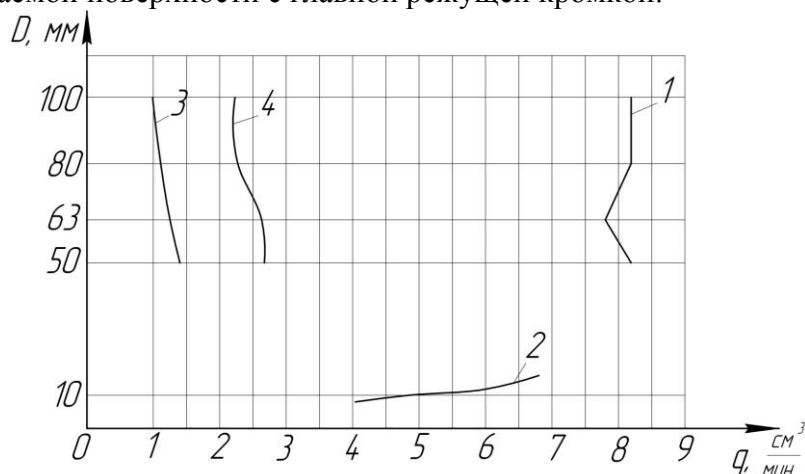


Рисунок – 12 График зависимости удельной производительности q ($\text{см}^3/\text{мин}$) от параметров инструмента (D – диаметр фрезы) при использовании различных фрез: 1 – торцевой фрезой, 2 – фрезой со сферической производящей поверхностью, 3 – цилиндрической фрезой, 4 – угловой двухсторонней фрезой (угол при вершине 60°)

На рисунке 13 представлены срезаемые слои металла для сравниваемых способов.

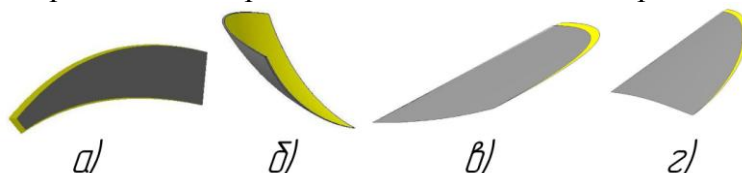


Рисунок – 13 Срезаемые слои при осуществлении метода обката: а) – торцевой фрезой, б) – фрезой со сферической производящей поверхностью, в) – цилиндрической фрезой, г) – двухугловой фрезой (угол при вершине 60°)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по металлообработке. АВ Sandvik Coromant2008.09
2. Амбросимов, С.К. Моделирование траекторий движений инструмента при обработке поверхностей типа ручьёв / С.К. Амбросимов // СТИН. - 2006. №8. – с. 33 – 35.
3. Амбросимов, С.К. Моделирование траектории движений инструмента при обработке сложнопрофильных поверхностей / С.К. Амбросимов // Автомобильная промышленность 2001. – №8. – с. 28 – 29.
4. ГОСТ 29092-91. Фрезы цилиндрические. Технические условия.
5. ГОСТ 50181-92. Фрезы угловые двухсторонние. Технические условия.

Амбросимов Сергей Константинович

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»
Тел. (4742) 74-39-36

Большаков Алексей Николаевич

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк
Инженер
Тел. 8-951-305-36-62

С.Н. ЗЛОБИН

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В КРИВОШИПНОМ ПРЕССЕ С ГИДРОДЕМПФЕРОМ ПРИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Представлены результаты теоретических исследований влияния основных параметров гидродемпфера на процессы в кривошипном прессе при вырубке.

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

The results of the theoretical researches under the influence of the main parameters of the hydrodamper on the processes in the crank press by the chipping are shown.

Key words: the crank press, the hydrodamper, the cutting operations, tensile force on the connecting rod.

Выполнение разделительных операций на кривошипных прессах сопровождается динамическими нагрузками, вызванными упругой разгрузкой деталей пресса после скола заготовки, величина которых в ряде случаев превышает технологические силы в несколько раз, что приводит к разрушению деталей пресса и ухудшает качество получаемых изделий.

Для снижения динамических нагрузок, возникающих в кривошипных прессах при выполнении разделительных операций, предлагается использовать демпфирующее устройство (гидродемпфер) [1]. Для расчета основных параметров гидродемпфера разработана математическая модель, описывающая динамические процессы, происходящие в кривошипном прессе с гидродемпфером при выполнении разделительных операций. Принимаемые допущения, начальные условия, а также уравнения, входящие в математическую модель подробно изложены в работе [2].

Решение системы уравнений, входящих в математическую модель, выполнялось численным интегрированием на ПЭВМ с помощью пакета MathCAD, имеющего встроенную функцию *rkfixed* для нахождения неизвестных параметров системы методом Рунге-Кутты.

В результате решения системы уравнений построена зависимость силы на шатуне P_d от времени при выполнении разделительных операций на кривошипном прессе без гидродемпфера и с гидродемпфером (рисунок 1).

Анализируя данные зависимости можно заметить, что процесс вырубki заготовки состоит из четырех основных участков: участка нарастания технологической силы на ползуне, разгрузки исполнительного механизма, участка пересопряжения зазоров в исполнительном механизме и участка нагружения исполнительного механизма растягивающей силой. Такая картина нагружения кривошипных прессов при вырубке соответствует действительности и подтверждается многочисленными экспериментальными данными [3, 4].

Таким образом, характер и анализ приведенных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что разработанная математическая модель достаточно точно отражает качественную картину процессов, происходящих в кривошипном прессе при выполнении разделительных операций, и может быть использована для исследования данных процессов.

Из графиков видно, что при вырубке с силой 218 кН растягивающая сила P_p , возникающая после скола заготовки, без гидродемпфера равняется 67,8 кН, что составляет 31,1 % от силы вырубki, а с гидродемпфером – 26,4 кН, что составляет 12,1 % от силы вырубki. Следовательно, применение разработанного гидродемпфера снизило растягивающую силу на шатуне в 2,57 раза.

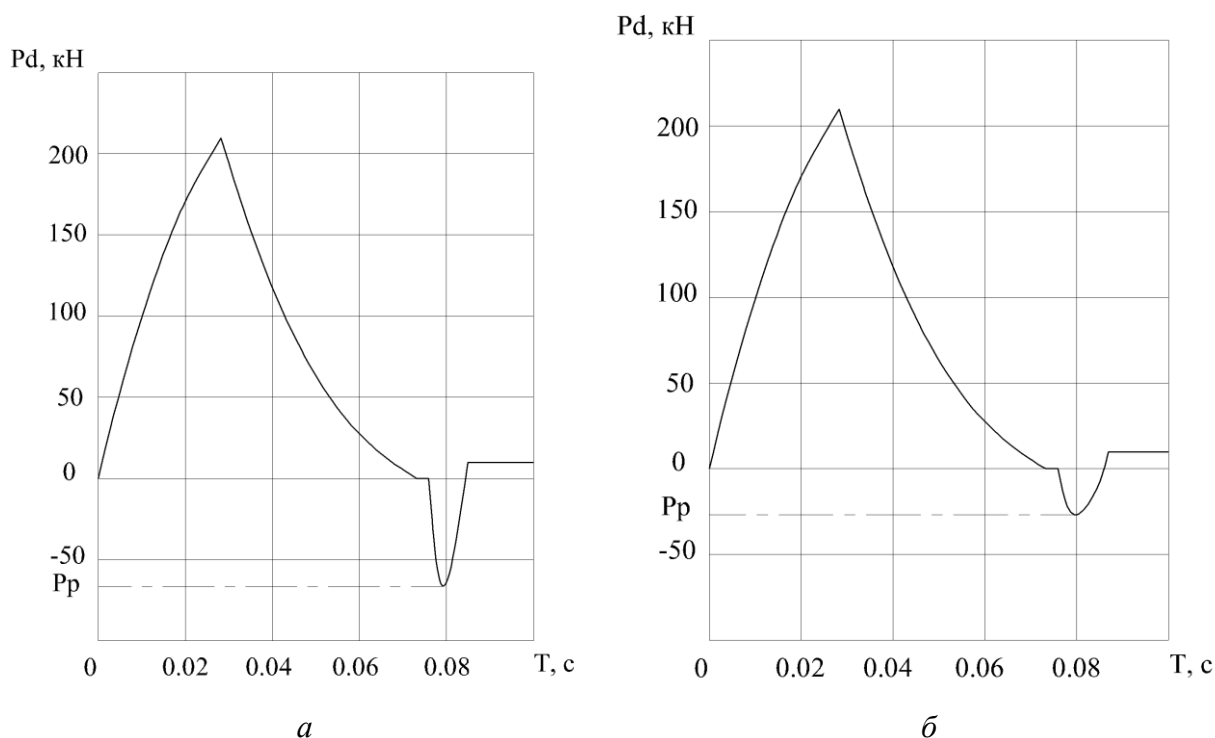


Рисунок 1 – Зависимость силы на шатуне P_d от времени
 а – без гидродемпфера; б – с гидродемпфером

Для исследования процессов в прессе, происходящих после скола заготовки, введен коэффициент динамичности при разгрузке пресса k_d , характеризующий степень проявления динамических нагрузок в исполнительном механизме:

$$k_d = \frac{P_p}{P_d}. \quad (1)$$

Величина k_d определяется параметрами динамической системы пресса. Чем больше значение коэффициента k_d , тем ниже динамические качества исполнительного механизма пресса при его разгрузке.

Коэффициент динамичности и динамические качества исполнительного механизма пресса при его разгрузке непосредственно влияют на коэффициент загрузки оборудования по силе, который определяется следующим образом:

$$k_{заг} = \frac{P_d}{P_H}, \quad (2)$$

Следовательно, чем больше значение коэффициента динамичности, тем меньше коэффициент загрузки оборудования по силе. Поэтому надо стремиться к снижению коэффициента динамичности пресса.

Было рассмотрено влияние гидродемпфера на динамичность пресса. Для этого построены графики зависимости растягивающей силы на шатуне от силы вырубки и коэффициента загрузки оборудования по силе без гидродемпфера и с гидродемпфером (рисунок 2).

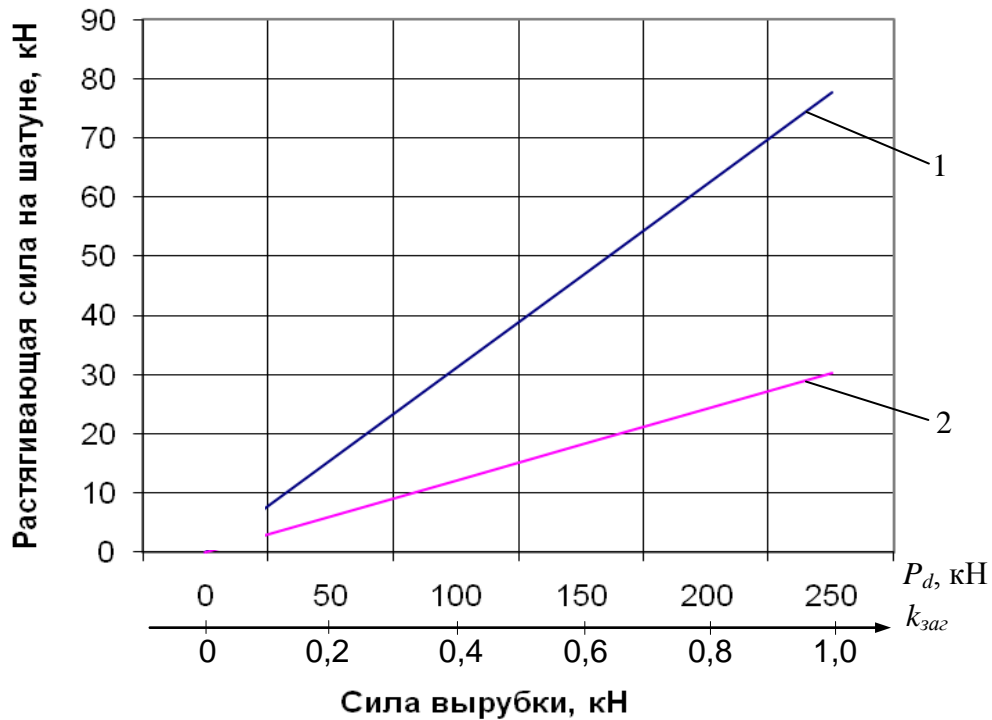


Рисунок 2 – Зависимость растягивающей силы на шатуне от силы вырубki и коэффициента загрузки оборудования по силе
1 – без гидродемпфера; 2 – с гидродемпфером

Анализируя данные графики, можно отметить, что при вырубке без гидродемпфера с силой 154 кН растягивающая сила достигает допустимого значения для материала шпилек крепления крышки шатуна к шатуну (сталь 45). В тоже время с гидродемпфером возможно осуществлять вырубку с полной номинальной силой без возникновения при этом опасных динамических нагрузок. Коэффициент динамичности при вырубке полной номинальной силой снижается в 2,57 раз с 77,75 кН при вырубке без гидродемпфера до 30,28 кН – без гидродемпфера. Следовательно, можно сделать вывод, что применение гидродемпфера позволяет снизить коэффициент динамичности прессы и повысить коэффициент загрузки оборудования по силе до значений, близких к единице.

Было выполнено исследование влияния основных параметров гидродемпфера, таких как, диаметра отверстия дроссельной шайбы, диаметра поршня, начального давления рабочей жидкости в цилиндре гидродемпфера и объема рабочей жидкости в гидродемпфере на процессы в прессы при вырубке.

В качестве базовых приняты следующие значения параметров гидродемпфера:

- диаметр отверстия дроссельной шайбы $d = 0,006$ м;
- начальное давление рабочей жидкости в цилиндре гидродемпфера $p_a = 1,26 \cdot 10^5$ Па;
- диаметр поршня $D = 0,125$ м;
- объем рабочей жидкости в гидродемпфере $V = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м³.

Диапазоны изменения значений параметров приняты следующими:

$$d = 0,002 - 0,016 \text{ м}; p_a = 0,84 \cdot 10^5 - 2,1 \cdot 10^5 \text{ Па}; D = 0,1 - 0,18 \text{ м}; V = 2,5 \cdot 10^{-4} - 6,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Таким образом, принимая три параметра базовыми и изменяя четвертый параметр в выбранном диапазоне его значений, определялось влияние данного параметра на растягивающую силу на шатуне P_p .

В качестве вырубаемого материала принимался материал Сталь 65Г толщиной 2 мм. Сила вырубki составляла 218 кН, т.е. 87 % от P_H .

Полученные в ходе исследования математической модели графики представлены на рисунке 3.

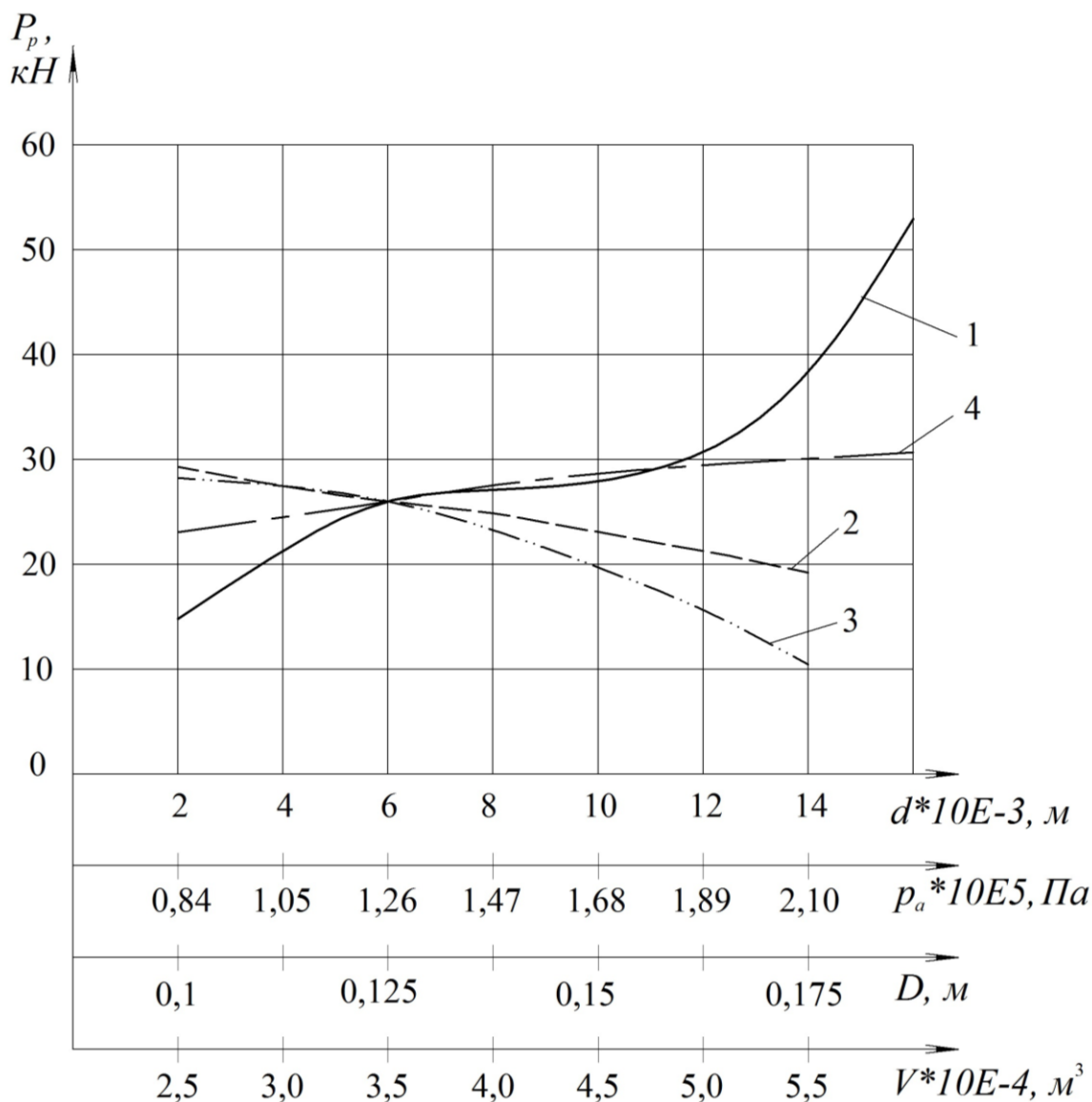


Рисунок 3 – График исследования влияния параметров гидродемпфера на растягивающую силу на шатуне P_p

- 1 – диаметр отверстия дроссельной шайбы d ; 2 – начальное давление рабочей жидкости в цилиндре гидродемпфера p_a ; 3 – диаметр поршня D ;
4 – объем рабочей жидкости в гидродемпфере V

Анализ представленных на рисунке 3 графиков показывает, что наибольшее влияние на растягивающую силу на шатуне оказывает изменение диаметра отверстия дроссельной шайбы, причем, чем меньше диаметр, тем меньше растягивающая сила. Увеличение диаметра свыше 10 мм приводит к резкому увеличению растягивающей силы, что объясняется уменьшением сопротивления истечению рабочей жидкости через дроссель. В то же время, уменьшение диаметра отверстия дроссельной шайбы ниже базового значения (6 мм) хотя и позволяет значительно снизить растягивающую силу на шатуне, приводит к увеличению давления рабочей жидкости в цилиндре гидродемпфера за счет повышения сопротивления истечению рабочей жидкости через дроссель, повышению силы трения в уплотнениях гидродемпфера и, следовательно, повышению энергозатрат, необходимых для совершения рабо-

ты холостого хода. Поэтому оптимальное значение диаметра отверстия дроссельной шайбы следует выбирать в интервале от 6 до 10 мм.

Начальное давление рабочей жидкости и диаметр поршня гидродемпфера прямо пропорциональны силе, действующей на ползун прессы со стороны поршня гидродемпфера. Поэтому увеличение начального давления рабочей жидкости и диаметра поршня гидродемпфера приводят к снижению растягивающей силы. При проведении экспериментов целесообразно исследовать влияние только начального давления рабочей жидкости ввиду сложности изменения диаметра поршня (необходимо иметь несколько гидродемпферов с разными диаметрами поршней), а силу на поршне легко менять, изменяя начальное давление рабочей жидкости за счет деформации пружины аккумулятора.

Изменение объема рабочей жидкости незначительно сказывается на изменении растягивающей силы. Так увеличение объема рабочей жидкости в 2,4 раза приводит к повышению растягивающей силы в 1,3 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Пат. 2252143 Российская Федерация МПК⁷, В 30 В 15/28. Демпфирующее устройство к прессу / Злобин С.Н.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет – №2004103650/02; заявл. 09.02.2004; опубл. 20.05.2005, Бюл. № 14.

2 Петров, Н.В. Математическая модель процессов в кривошипном прессе с гидродемпфером / Н.В. Петров, С.Н. Злобин // Заготовительные производства в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2007. – № 9. – С. 29-32.

3 Катков, Н.П. Экспериментальное исследование динамики крупных кривошипных прессов при вырубке толстолистовой стали / Н.П. Катков, В.Г. Крешнянский, Г.П. Гусихин, И.А. Исаев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 3. – С. 16-19.

4 Крешнянский, В.Г. Исследование динамики и способа снижения динамических нагрузок в кривошипно-ползунном механизме прессы при разделительных операциях: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / В.Г. Крешнянский – Челябинск, 1973. – 188 с. – Библиогр.: С. 126-133.

Злобин Сергей Николаевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. (4862) 41-98-35

E-mail: zsn2@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА СВАРНЫХ ТРУБ, ОБРАБОТАННЫХ ДОРНОВАНИЕМ

Приведены результаты экспериментальных исследований сварной трубы, подвергнутой пластическому деформированию методом дорнования отверстия. Выявлены особенности структур и распределение твердости в основном металле и в сварном шве. Определены условия деформирования, при которых обеспечивается равномерность упрочнения по периметру трубы

Ключевые слова: сварная труба, пластическое деформирование, дорнование.

Results of experimental researches of the welded pipe subjected to plastic deformation by a burnishing method of an aperture are resulted. Features of structures and distribution of hardness in the basic metal and a welded seam are revealed. Deformation conditions at which uniformity of hardening on pipe perimeter is provided are defined

Key words: a welded pipe, plastic deformation, mandrelling.

Цель настоящей работы – экспериментальные исследования структуры металла сварных труб из низкоуглеродистых сталей после дорнования и оценка возможности их применения для изготовления составных цилиндров, работающих под давлением. Составной цилиндр состоял из двух пустотелых цилиндрических заготовок, одна из которых (внутренняя)

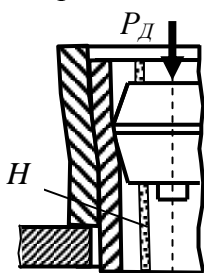


Рисунок 1 – Схема дорнования отверстия составного цилиндра:
Н – сварной шов

изготовлена из сварной трубы, другая (внешняя) – из бесшовной. Внешняя заготовка составной трубы была изготовлена из стали 45 с диаметром отверстия $\varnothing 34,5$ мм и наружным диаметром 44,5 мм. Заготовки из сварных труб, полученных путем свертывания на вальцах металлической ленты из стали 10, с последующей сваркой, имели наружный диаметр $D=33,7$ мм и внутренний $d=28,5$ мм. Длина всех образцов была одинаковой: $L=80$ мм. Схема дорнования составного цилиндра из бесшовной и сварной заготовки приведена на рисунке 1. Внешняя и внутренняя заготовки имели малые толщины стенок, поэтому соединение в целом представляло собой двухслойную цилиндрическую оболочку. При дорновании использовался набор дорнующих зубьев с увеличивающимися через 0,5 мм диаметрами. Сварную заготовку устанавливали в бесшовную и образовавшийся составной цилиндр подвергали раздаче методом многопроходного дорнования. [1]. В ходе экспериментов определяли изменение структуры внутренней заготовки в зоне сварного шва.

В процессе пластической деформации происходят существенные изменения структуры деформируемого материала и его упрочнение. В рассматриваемом случае важно определить изменение этих параметров в области сварного шва и примыкающей к нему зоны. При этом для выявления механизма упрочнения–разупрочнения нужно рассматривать процесс через призму атомного строения металлов до и после пластического деформирования. Известно, что металлы состоят из кристаллов (зерен), расположение атомов в которых соответствует трехмерной решетке. Кристаллическую структуру металла можно представить в виде атомных плоскостей или слоев. В процессе дорнования сварной заготовки возникают напряжения сдвига, заставляющие две соседние плоскости металлического образца скользить друг по другу в противоположных направлениях. При этом один слой атомов может сдвинуться на целое межатомное расстояние. Механизм этого сдвига в идеальных (бездефектных) кристаллах предполагает одновременное перемещение всех атомов одной части кристалла относительно другой. В реальных кристаллах сдвиг осуществляется последовательным эстафетным движением дислокаций вдоль плоскостей скольжения.

При пластической деформации кристаллы дробятся на фрагменты и блоки с большими искажениями кристаллической решетки на их границах. Границы фрагментов и блоков служат препятствием для сдвиговой деформации, и с увеличением их количества соответственно возрастает число границ, около которых задерживаются дислокации. Увеличение степени разориентировки фрагментов и блоков дополнительно повышает сопротивление границ прохождению через них дислокации, что также увеличивает сопротивление деформированию. Это является основной причиной упрочнения металлов при ППД, в частности, при дорновании. Интенсивность процесса дробления блоков зависит от химического состава и физико-механических свойств металла. Как только микроискажения достигают некоторого предела, способность решетки к продолжению деформации оказывается исчерпанной. При дальнейшем росте давления образуются микротрещины, начинается разрушение деформированных поверхностей.

Теория дислокаций позволяет предположить следующий механизм упрочнения металла при дорновании отверстий трубчатых заготовок. В приповерхностных слоях обрабатываемого металла возникает пластическая деформация. Зарождаясь в микрообъемах, вследствие своего сдвигового характера, она распространяется по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям. Внутри кристаллов зерен металла происходит интенсивное образование и движение дислокаций. При этом скорость образования дислокаций возрастает с увеличением времени действия и абсолютной величины деформирующих напряжений, причем увеличение количества дислокаций наблюдается в начальный момент приложения нагрузки, т. е. при вхождении первых зубьев дорна в контакт с заготовкой. Движущиеся дислокации, встречаясь с препятствиями, в частности, с дислокациями, расположенными в другой плоскости, блокируются, иначе — закрепляются. В процессе поверхностного деформирования плотность дислокации может возрасти на несколько порядков [3], в наклепанном металле увеличивается плотность образующихся точечных дефектов (вакансий), которые становятся источниками новых дислокаций.

Изучение микроструктуры структуры металла производилось на металлографическом микроскопе МИМ-7. Увеличение микроскопа определялось как произведение соответствующих увеличений объектива и окуляра. Подготовленный шлиф помещали перпендикулярно оптической оси микроскопа в плоскости, совпадающей с передней главной фокальной плоскостью объектива. Изображение микроструктуры образцов фотографировали, используя специальный фотоокуляр, который принимает световые лучи, идущие непосредственно из объектива, и создает действительное первичное изображение на фотографии (рисунок 2).

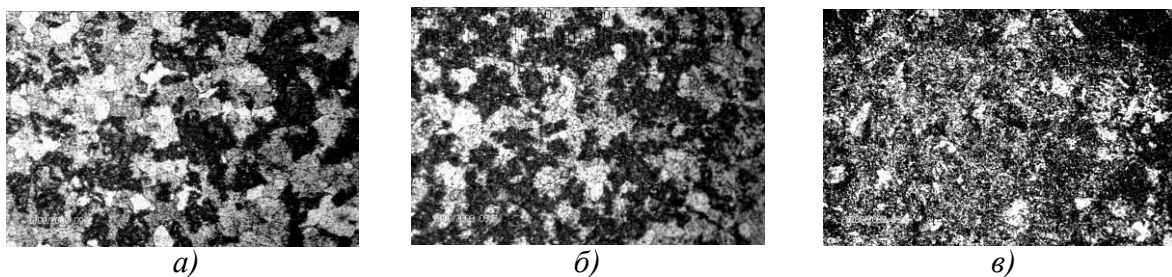


Рисунок 2 – Структура металла до дорнования трубы:
а) – в основном металле; б) – в околошовной зоне; в) – в сварном шве

Исследования показали, что в образцах до дорнования формы и размеры зерен в зоне основного металла и в зоне сварного шва различны, что наглядно просматривается на рисунке 2.

При дорновании происходит изменение ориентации кристаллов за счет сдвига кристаллитов под действием прилагаемых нагрузок вдоль определенных плоскостей скольжения и вследствие этого упрочнение материала, причем тем большее, чем больше степень деформации, которая растет с увеличением натяга дорнования. Под действием увеличивающейся внешней нагрузки некоторые кристаллиты могут достичь такой величины упрочнения, что их деформация окажется чисто упругой, а пластичность материала понизится.

Как показали исследования, в заготовке из стали 10 происходит изменение формы и размеров зерна (рисунок 3). По сечению сварного шва образуется разнотернистая структура, происходит изменение содержания углерода в стали. Степень измельчения зерна по сечению сварного шва и основного металла различная. Структура перлита в центральной зоне сварного шва становится более крупнозернистой, чем в матрице. Процессы сдвига металла, происходящие при дорновании сварной трубы, рождают множество экстраплоскостей и резкое увеличение количества дислокаций. Возникают наклепочные зерна, вытянутые в направлении действующей деформации (строчечная структура) и имеющие более высокую плотность дислокаций. Текстура строчечной микроструктуры изменяется по сечению сварного шва и зависит от исходной структуры сварной заготовки (сравни с рисунком 2).

Значительно возрастает число точечных и поверхностных дефектов (вакансий, межузельных атомов, границ и блоков). Такое увеличение числа дефектов решетки (в первую оче-

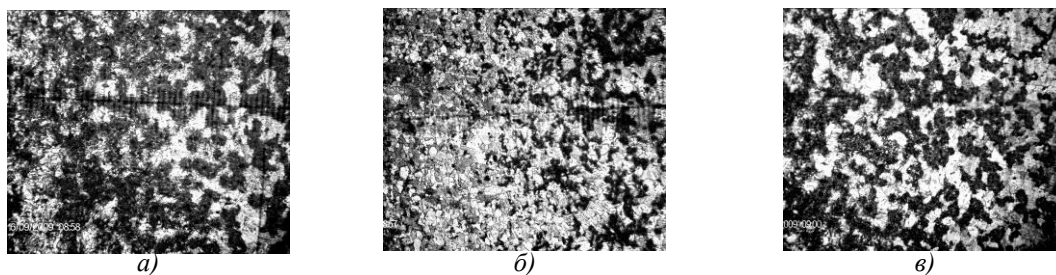


Рисунок 3 – Структура металла сварной трубы после дорнования а, в) в основном металле, б) в сварном шве

редь дислокаций) затрудняет дальнейшее скольжение дислокаций, повышает сопротивление металла сдвигу, что способствует упрочнению металла. С другой стороны, ограничение подвижности дислокаций приводит к снижению пластичности за счет уменьшения способности металла к пластической деформации.

Эффект упрочнения связан с изменением твердости металла, причем вследствие различной степени упрочнения по сечению исследованных образцов твердость в разных зонах должна быть неодинакова. Связь упрочнения с твердостью, достигаемой дорнованием, определялась экспериментально с использованием упрочненных и неупрочненных образцов сварных труб до и после дорнования.



Рисунок 4 – Отпечатки алмазного индентора прибора ПМТ – 3

С целью более глубокого изучения свойств и структурных превращений материала в области сварного шва и основного металла определяли «усредненную» твердость, учитывающую суммарное влияние присутствующих в сплаве фаз и структурных составляющих, и твердость отдельных фаз и структур сплава. Микротвердость определяли вдавливанием алмазной пирамиды на приборе ПМТ – 3 с последующим измерением диагоналей отпечатка (рисунок 4). Измерения производили не менее двух-трех раз. Результаты измерений получали расчетом согласно принятой методики по формуле:

$$HASTP^2, \text{ кгс/мм}^2, \quad (1)$$

где H – число твердости, кгс/мм²;

P – нагрузка в граммах;

C – диагональ отпечатка в микрометрах.

Измерения производились в центре, на внутренней и наружной поверхностях сварной заготовки на подготовленном косом шлифе, что при цене деления микрометрического винта прибора 0,01 мм позволило получить необходимую картину распределения твердости по толщине стенки, которая до и после дорнования была равной 3 и 2 мм. Полученные данные

использованы для построения графиков, приведенных на рис. 5 (до дорнования) и 6 (после дорнования).

Видно, что в первом случае твердость в основном металле (рисунок 5,а) практически одинакова и составляет в среднем 145 МПа. Некоторое снижение твердости вблизи поверхности отверстия (около 1,5 %) статистически незначимо и им можно пренебречь. В сварном шве (рисунок 5,б) вблизи поверхности отверстия твердость металла несколько выше, чем у наружной. Объясняется это тем, что на внутренней поверхности при сварке образовывается валик сварного шва, который в процессе сварки и последующем охлаждении оказывает влияние на микроструктуру металла. Изменение микроструктуры отражается на изменении твердости металла сварного шва по толщине стенки примерно на 5 % (10 МПа). Интенсивность увеличения твердости от наружной поверхности трубы к внутренней можно описать линейной зависимостью, однако видимое изменение сравнительно мало, что позволяет считать свойства металла одинаковыми по всей толщине стенки.

Сравнивая полученные данные, видим, что твердость металла сварного шва и основного металла до пластического деформирования (дорнования) существенно неодинаковы. На

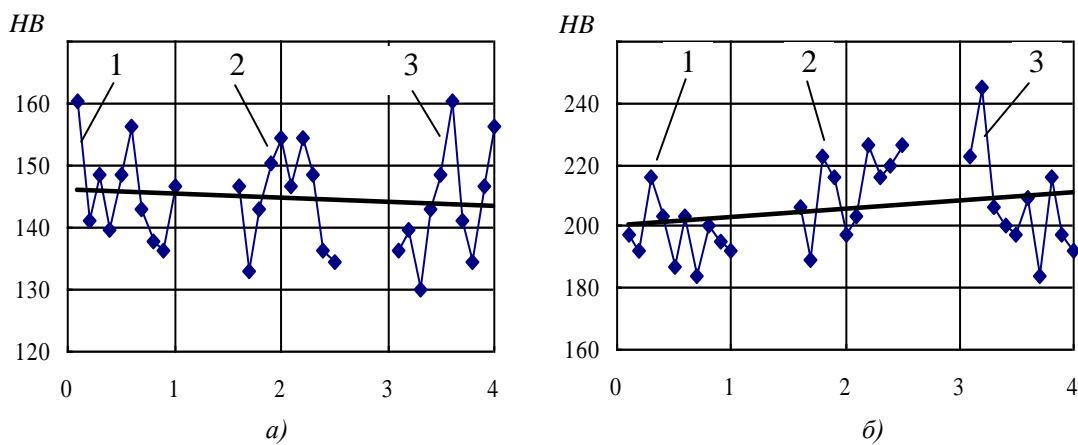


Рисунок 5 – Распределение твердости металла по толщине стенки сварной трубы до дорнования:
 а) – в основном металле; б) – в сварном шве. Место измерения твердости:
 1, 3 – вблизи наружной и внутренней поверхностей трубы;
 2 – в средней части толщины стенки

наружной поверхности трубы разница составляет 54 МПа, а на внутренней – 66 МПа. Разница твердостей сварного шва и основного металла составила около 22%. Однако можно отметить, что в каждой из выделенных зон измерений (внутренней, наружной и посередине толщины стенки) распределение значений твердости по толщине стенки заготовки в основном металле и сварном шве примерно равномерное.

Исследования показали, что исходная заготовка сварной трубы (т.е. до пластического деформирования) отличается существенно разными характеристиками микроструктуры и физических свойств основного металла и сварного шва. В каждой из названных областей свойства металлов качественно можно считать одинаковыми, но их количественные характеристики существенно различные. В частности, твердость металла в сварном шве может быть больше до 50% по сравнению с основным.

После пластического деформирования составного цилиндра структуры основного металла и сварного шва изменились (рисунок 6). Твердость основного металла (рисунок 6,а) увеличивается от внутренней поверхности трубы к наружной от 197 МПа до 210 МПа. Видимое на графике снижение твердости вблизи поверхности отверстия (около 6 %) статистически незначимо и им можно пренебречь. В сварном шве (рисунок 6,б) вблизи поверхности отверстия твердость металла выше, чем у наружной. Объясняется это тем, что перед дорнованием отверстия составного цилиндра валик сварного шва не удалялся из трубы, деформация валика была существенно велика, что и привело к его значительному упрочнению. Изменение микроструктуры отражается на изменении твердости металла сварного шва по толщине стенки и состав-

ляет примерно 13 % (35 МПа). Интенсивность увеличения твердости проявляется от наружной поверхности заготовки к внутренней описывается линейной зависимостью.

Видно, что значения твердостей основного металла и сварного шва после пластического деформирования (дорнования) существенно выросли.. На наружной поверхности трубы разница составила 40 МПа, на внутренней – 88 МПа. Увеличение твердости сварного шва и основного металла составило около 56 %. Анализ показал, что в каждой из выделенных зон

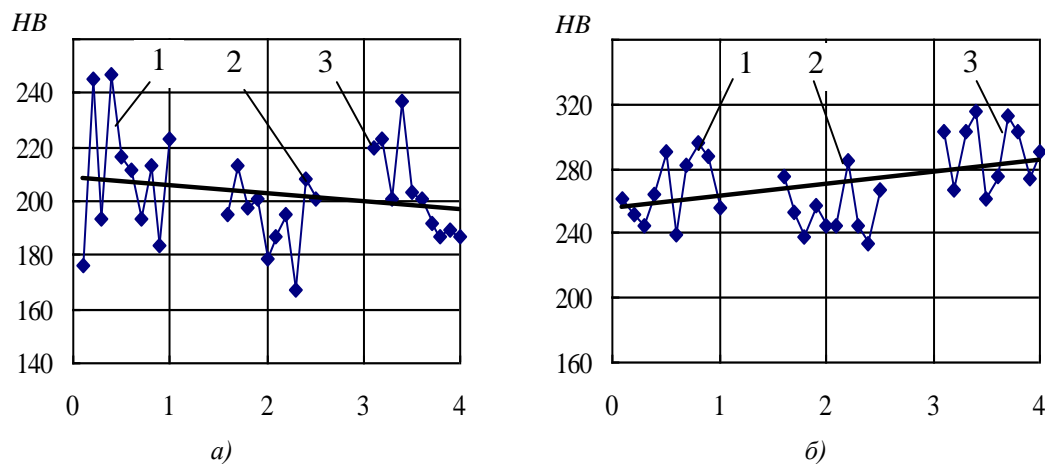


Рисунок 6 – Распределение твердости металла по толщине стенки сварной трубы после дорнования:
 а) в основном металле; б) в сварном шве.

Место измерения твердости: 1, 3 – вблизи наружной и внутренней поверхностей трубы; 2 – в средней части толщины стенки

измерения (внутренней, наружной и посередине толщины стенки) соотношение твердостей в основном металле и сварном шве несколько выровнялось.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить влияние деформационного процесса на структуру и механические свойства сварной заготовки, подвергнутой дорнованию. Установлены соотношения твердостей основного металла и металла сварного шва до и после пластического деформирования заготовки.

На основе проведенных исследований можно утверждать, что дорнование в рассмотренном случае повышает плотность дислокаций в упрочненном слое, измельчает субструктуру, т.е. является эффективным методом локального упрочнения мест концентраций напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайдес, С.А. Технологическая механика осесимметричного деформирования: монография / С.А. Зайдес, А.Н. Исаев. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 432 с.
2. Исаев, А.Н. Применение сварных трубчатых заготовок при изготовлении составных цилиндров / А.Н. Исаев, С.А. Земляной // Совершенствование существующих и создание новых технологий в машиностроении и авиастроении: 1 международная научно техническая конференция Ростов н/Д, 2009 г.
3. Исаев, А.Н. Интенсивность деформаций при дорновании отверстий трубчатых заготовок / А.Н. Исаев, В.Г. Солоненко Инновации в машиностроении. – Пенза: ПГУ, 2004. – С. 57 – 60.

Исаев Альберт Николаевич

Ростовская Государственная академия сельскохозяйственного машиностроения
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология автоматизированного машиностроения»
 тел. (863) 2524135, 9061836725
 E-mail: anis@tam.rgashm.ru

Земляной Сергей Александрович

Ростовская Государственная академия сельскохозяйственного машиностроения
 Аспирант кафедры «Технология автоматизированного машиностроения»
 тел. (863) 2524135, 9287559725
 E-mail: anis@tam.rgashm.ru

А.М. КОЗЛОВ, Д.В. БОЛГОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Представлен математический аппарат для моделирования процесса совмещенной обработки: хонингование-расточивание. Дано описание процесса взаимодействия поверхностей рабочих элементов инструмента с заготовкой.

Ключевые слова: абразивная обработка, процесс совмещенной обработки, хонингование, заготовка.

Mathematical tool for modeling of process of fetch filtering: honing-boring is offering. Description of process interaction flats of tool's working elements with billet is giving.

Key words: abrasive processing, process of the combined processing, preparation.

Хонингование является распространенной финишной операцией, на которой формируются основные эксплуатационные параметры обрабатываемой поверхности детали. В ряде случаев при проектировании процессов хонингования поиск путей повышения производительности, точности и качества возможен за счет применения новых способов ведения обработки.

При назначении режимов обработки и выбора конструкции инструмента необходимо знать точность, производительность, и, как результат, эффективность применения выбранного инструмента. Точность обработки при хонинговании – один из важнейших показателей процесса. Имея возможность ее прогнозирования, технолог может выбирать конструкцию инструмента и назначать режимы обработки, основываясь не только на производственном опыте, но и на основе расчетов, с учетом требований, предъявляемых к обрабатываемой поверхности и возможностей станочного оборудования. Следовательно, необходимо еще на стадии проектирования технологического процесса смоделировать процесс обработки инструментом конкретной поверхности, имеющей определенную технологическую наследственность [1...3].

Был предложен совмещенный способ обработки отверстий гильз цилиндров: хонингование-сверхтонкое точение [4].

В соответствии с поставленной задачей разработана компьютерно-ориентированная модель совмещенного процесса обработки цилиндрической поверхности отверстия. Для анализа эффективности применения абразивно-лезвийной обработки представляется необходимым рассчитать величину припуска, срезаемого резцами и удаляемого абразивными брусками (расточные резцы и бруски хона – рабочие элементы (РЭ) инструмента). Была разработана модель взаимодействия РЭ с обрабатываемой поверхностью с учетом влияния формы заготовки на режим самоустанавливаемости инструмента.

Внутренняя поверхность заготовки представлялась в виде матрицы размером 20000x20000 элементов. Значение элемента матрицы – это величина припуска s , отсчитываемого от номинального профиля детали (рисунок 1). Размеры матрицы обусловлены необходимой точностью моделирования: для детали размером 200 x 90 мм один квадратный миллиметр аппроксимировался 10 тысячами элементов, представленными в виде матрицы размером 100x100.

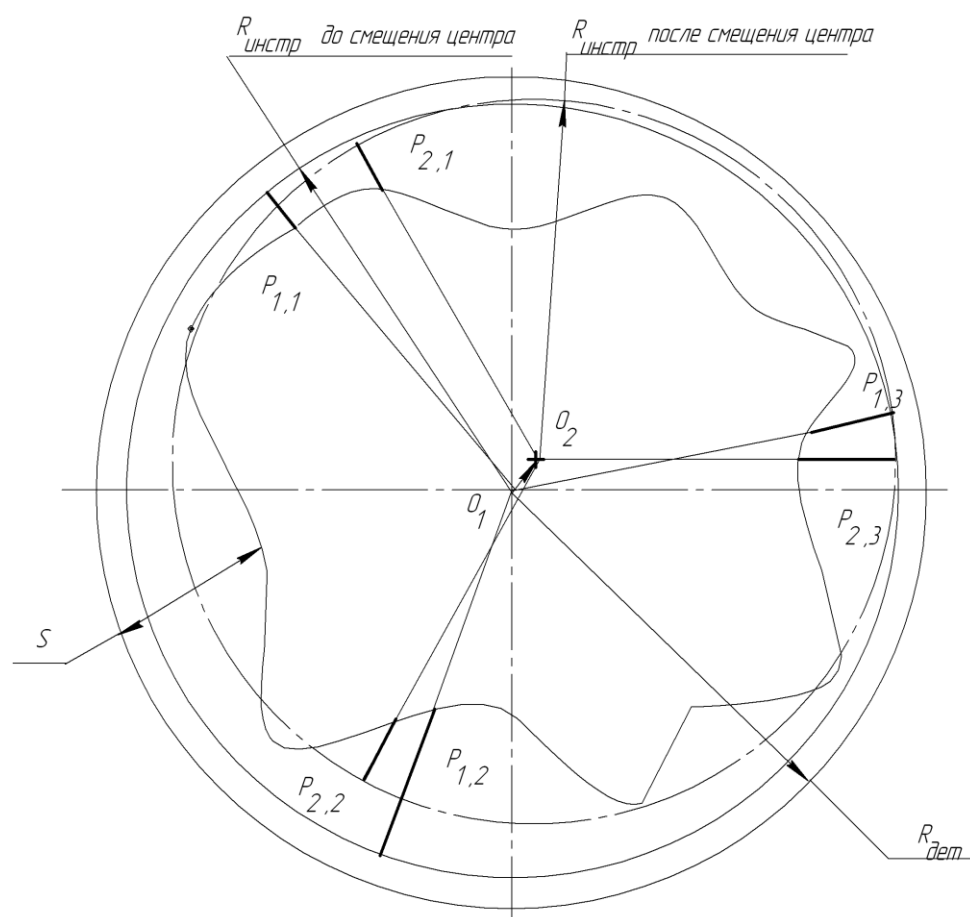


Рисунок 1 – Расчетная схема определения результирующего вектора сил

При проведении исследований учитываются такие виды погрешностей: отклонение от круглости, отклонение профиля продольного сечения (бочко- и седлообразность), пространственное отклонение оси.

Следующий шаг после формирования модели поверхности заготовки – моделирование процесса взаимодействия поверхностей рабочих элементов (РЭ) инструмента с заготовкой. На первом этапе рассчитывали положение оси инструмента, изменяющееся при вращении и возвратно-поступательном движении хона под влиянием формы заготовки.

Для анализа влияния действующих сил на положение центра хона рассмотрено поперечное сечение зоны взаимодействия инструмента с заготовкой. Изначально положение центра, или оси (O_1) определяется координатами $(x_o; y_o)$, и оно совпадает с центром обрабатываемого отверстия. Затем, под действием сил $P_1 \dots P_n$, где n – количество толкателей хона в ярусе [4], ось хона стремится занять такое положение (O_2), при котором результирующая сил будет минимальна. При моделировании поиск нового положения оси происходил с применением метода последовательных приближений с задаваемой пользователем точностью. Как правило, данный расчет происходил за 7...8 итераций. Для определения орт-вектора, или направления перемещения оси, осуществляли построение матрицы действующих векторов с последующим приведением сил к центру инструмента. Точку приложения силы принимали за вершину РЭ хона, а ее координаты $(x_i; y_i)$ рассчитывали по формулам:

$$\begin{cases} x_i = x_o + R_{инстр} \cdot \sin \varphi \\ y_i = y_o + R_{инстр} \cdot \cos \varphi \end{cases}, \quad (1)$$

где $R_{инстр}$ – радиус инструмента;

φ – угол поворота.

Координаты второй точки вектора $(a_i; b_i)$, определяющей направление и величину действующей силы, рассчитывали по формулам:

$$\begin{cases} a_i = (R_{заг} - p + h) \cdot \sin \varphi^* \\ b_i = (R_{заг} - p + h) \cdot \cos \varphi^* \end{cases} \quad (2)$$

где $R_{заг}$ – радиус заготовки;

p – величина припуска,

h – отклонение формы в конкретной точке; текущий угол поворота (с учетом изменения положения центра) определялся:

$$\varphi^* = \arctan \frac{x_i}{y_i} \quad (3)$$

Затем матрицу условных сил приводили к виду:

$$M^{YC} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ a_1 - x_1 & a_i - x_i & a_n - x_n \\ b_1 - y_1 & b_i - y_i & b_n - y_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

Результирующий вектор рассчитывали по формуле:

$$\vec{M} = \left(\left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right]; \left[\frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} \right] \right) \quad (5)$$

Таким образом, за точку приложения действующих сил принимали положение оси. Текущее положение перемещали в сторону и на величину результирующего вектора:

$$\begin{cases} x_o = x_o + \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ y_o = y_o + \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \end{cases} \quad (6)$$

После смещения погрешность расчета определялась по формуле:

$$\Delta = \left| M_i^{YC} - M_{i+1}^{YC} \right| / M_i^{YC} \cdot 100, \quad (7)$$

и сравнивалась с заданной погрешностью

$$\Delta < \Delta_{задан} \quad (8)$$

Для определения искомого положения оси описанная процедура повторялась для всех ярусов абразивно-лезвийного инструмента с использованием разработанного алгоритма (рисунки 2) («ярус» – поперечное сечение инструмента, содержащее лезвийные элементы).

На следующем этапе происходит вычитание удаляемых объемов металла с учетом характеристик РЭ и уже рассчитанного положения оси хона.

Расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает 10...15 %.

Повышение интенсификации процесса резания путем использования совмещенной обработки позволяет повысить параметры точности и производительности до 20 %.

Математическое моделирование процесса совмещенной обработки: хонингованием-расточиванием позволяет назначать режимы такого метода, прогнозировать точность и производительность процесса получения отверстия.

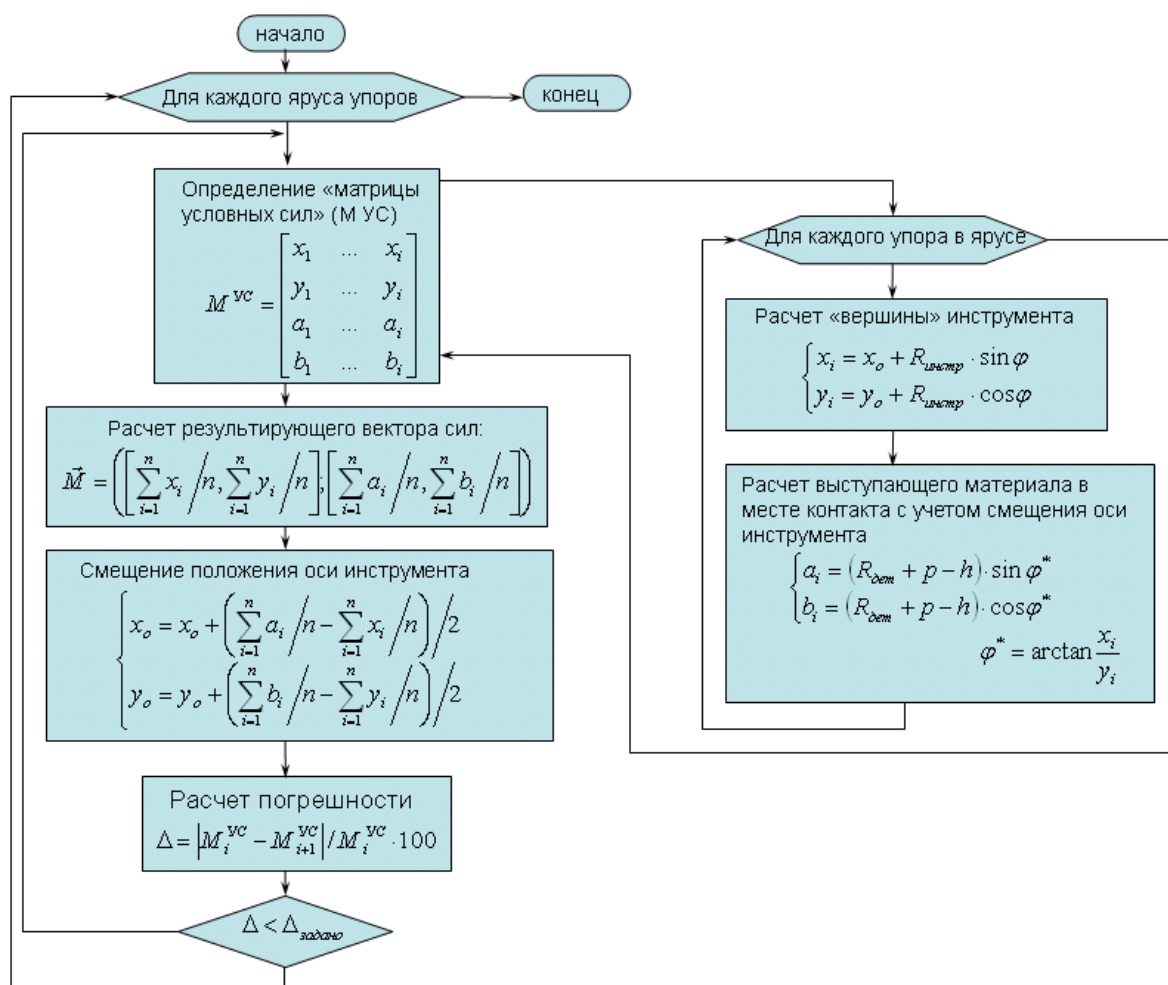


Рисунок 2 – Алгоритм определения положения оси абразивно - лезвийного инструмента

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кремень, З.И. Хонингование и суперфиниширование деталей. [Текст]: 3-е изд., перераб. и доп. / З.И. Кремень, И.Х. Стратиевский – СПб.: Машиностроение, 1988. – 137 с.
2. Куликов, С.И. Прогрессивные методы хонингования [Текст] / С.И. Куликов, Ф.Ф. Ризванов, В.А. Романчук. – М.: Машиностроение, 1983. – 135 с.
3. Оробинский, В.М. Абразивные методы обработки и их оптимизация: монография / В.М. Оробинский – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2000. – 314 с.
4. Козлов, А.М. Повышение производительности обработки отверстий комбинированным методом: хонингованием-расточиванием [Текст] / А.М. Козлов, Д.В. Болгов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы (Шлифабразив-2005). Сб. статей междунаро. научн.-техн. конф. - Волжский: Волжский институт строительства и технологий (филиал) ВолГАСУ. - Волжский, 2005. - С.95...97.

Козлов А.М.

Липецкий государственный технический университет, Липецк
 Доктор технических наук, профессор
 тел. (4842) 36-81-85
 E-mail: dmbolgov@mail.ru

Болгов Д.В.

Липецкий государственный технический университет, Липецк
 Кандидат технических наук
 тел. (4842) 36-81-85
 E-mail: dmbolgov@mail.ru

Н.И. МАРКИН, Э.А. КРАВЦОВА, С.А. МОСКВИТИН, К.И. КАПЫРИН, Т.В. ФЁДОРОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЕЗКИ ТОЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАГОТОВОК В СРЕДЕ DEFORM-3D

В статье приведены результаты моделирования процесса отрезки сдвигом в состоянии всестороннего сжатия в среде DEFORM. Оценка достоверности производилась путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. Расчёты и эксперименты выполнены для материалов: сталь 15 и сталь 45.

Ключевые слова: *короткие точные заготовки; отрезка в штампах; всестороннее сжатие; конечно-элементное моделирование отрезки.*

In article results of modeling of process cutting by shift in a condition of all-round compression in the environment of DEFORM are resulted. The reliability estimation was made by comparison of results of modeling with experimental data. Calculations and experiments are executed for materials: a steel 15 and a steel 45.

Keywords: *short exact preparations; a cut in stamps; all-round compression; is final-element modeling cutting.*

Существо вопроса

В настоящее время широкое распространение получает методика предварительного моделирования технологических процессов ОМД в специализированных математических пакетах. Особенно распространен в странах с высокоразвитой сталепрокатной промышленностью пакет DEFORM. В нашей стране он также получил широкую известность. Моделирование большого количества задач, связанных с пластической деформацией металла, выполняется в пакете DEFORM с высокой степенью точности, но при этом моделирование задач отрезки пластическим сдвигом освещено мало, хотя DEFORM и позволяет оценивать разрушение материала. Дело в том, что отрезка пластическим сдвигом имеет специфическую природу разрушения и все расчёты требуют проверки адекватности экспериментальным данным, а их-то как раз и нет в силу сложности реализации процесса.

В ранних статьях [1] были опубликованы результаты моделирования закрытой отрезки коротких заготовок, выполненных на кафедре "Автопласт" ОрелГТУ с использованием ППП "ШТАМП". Итогом моделирования отрезки пластическим сдвигом короткой заготовки от прутка с осевым подпором была установлена взаимосвязь напряжений, возникающих в заготовке, и качества поверхности реза при различных отношениях длины отрезаемой заготовки к ее диаметру. Полученные результаты можно считать предварительными, так как использовавшийся при моделировании ППП "ШТАМП" не имеет возможности отслеживать разрушение и выполнять перестройку сетки конечных элементов для новых поверхностей, по которым произошло разрушение. Кроме того, в данном пакете реализуется модель только плоской деформации и плоских напряжений. Решать объёмные задачи, к числу которых, безусловно, относится любая отрезка, для получения конкретных значений нельзя. Однако для получения начальных данных с целью дальнейшего исследования отрезки ППП "ШТАМП" оказался вполне пригоден. Так, например, можно принять как достоверные только те результаты моделирования, которые относятся к моменту начала внедрения ножа в заготовку, когда деформация носит локальный характер и может рассматриваться как плоская задача.

Дальнейшее моделирование процесса отрезки возможно только с использованием программного продукта, позволяющего решать объёмные задачи и отслеживать разрушение материала. В качестве такового был выбран DEFORM.

Краткое описание программного продукта

В программе "DEFORM-3D" реализуется несколько групп моделей. Для моделирования процесса отрезки была выбрана изотропная упругопластическая с упрочнением при неизменных упругих свойствах и малых упругих деформациях. Определяющее уравнение

представляет собой уравнение течения Прандтля-Рейсса [2,3].

Пакет использует классические уравнения механики сплошной среды и набор параметров, каждый из которых выбирается в соответствии с поставленной задачей. Основу динамического поведения модели составляют три условия: сохранение массы, равновесия сил и баланса энергии. Для решения этих уравнений необходимо владеть информацией о поведении материала, которая должна быть или постоянной, или изменяющейся по известному закону. В данном случае это плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона и закон упрочнения с соответствующими параметрами.

Исходные данные и расчетная схема для моделирования

Поставлена задача смоделировать отрезку заготовки от прутка в условиях всестороннего сжатия в штампе с коромысловой конструкцией упора с дальнейшей проверкой полученных решений в натуральных экспериментах.

Для этого необходимо:

1. Произвести расчеты в пакете при отрезке с заданными параметрами и граничными условиями, описанными ниже, т.е. для всех вариантов коэффициента λ , для которых были поставлены эксперименты ($\lambda = P_{OC} / P_{OTP}$ – степень сжатия).

2. Сопоставить полученные данные по усилию отрезки с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований. Провести дисперсионный анализ и сделать соответствующие выводы о точности моделирования и возможности использования полученных алгоритмов решения в условиях производства.

В расчётах использовалась модель цилиндрической заготовки диаметром $d=8$ мм. При моделировании конечно-элементным методом для получения точного результата необходимо использовать сетку с наибольшим количеством элементов. На практике это приводит к многократному снижению скорости расчета. Поэтому в расчете была использована сетка с дифференцированной по длине густотой элементов при максимальной густоте в зоне отрезки и минимальной на свободном конце. Первоначальное разбиение модели заготовки на конечные элементы (расчётная схема процесса) представлено на рисунке 1.

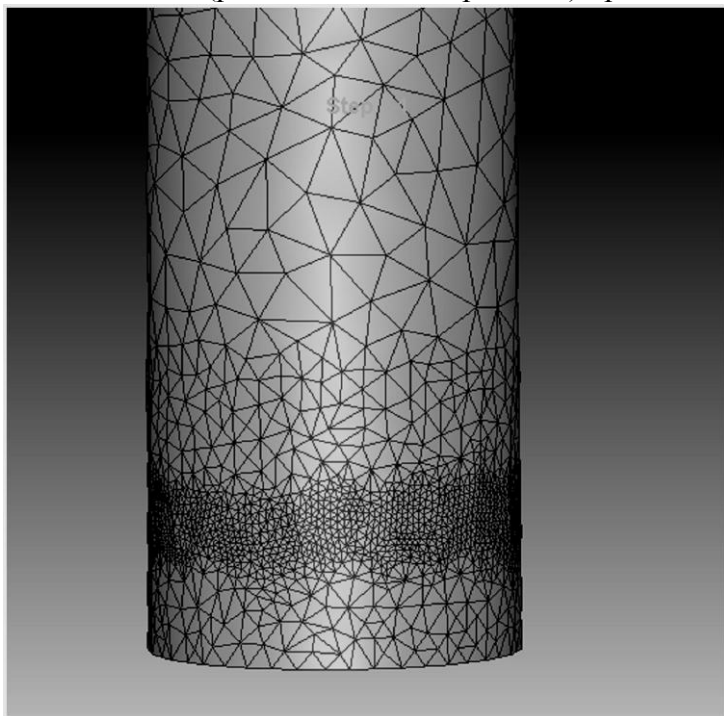


Рисунок 1 – Первоначальное разбиение модели заготовки на конечные элементы

К сказанному добавим, что для получения наилучшего по точности результата необходимо обеспечить выполнение условия сходимости. Для этого размер конечного элемента выбран таким образом, чтобы он оказался в 2 раза меньше зазора в инструменте (в данном случае зазора между ножами).

Большим достижением разработчиков пакета DEFORM является возможность моделирования разрушения материала и учета произошедших изменений геометрии и внутренних напряжений после разрушения. При моделировании была выбрана модель со сглаживанием разрушенных зон. При проведении расчета программа выполняет перестройку созданной на заготовке сетки с учетом произошедших локальных разрушений материала под действием избыточных напряжений, превышающих предел прочности

материала. В качестве критерия разрушения приняли критерий Normalized Cockcroft&Latham, поскольку он рекомендован разработчиками пакета для задач пробивки и

отрезки. Рекомендовано и значение критерия разрушения:

$$\int_{\bar{\sigma}}^{\bar{\sigma}^*} d\bar{\varepsilon} = 0.5, \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжения;

$\bar{\sigma}^*$ –тензор максимальных нормальных напряжений;

$\bar{\varepsilon}$ – интенсивность деформаций.

Условия рекристаллизаций материала, диффузии с инструментом и нагрева при деформации в расчете не использовались. Пример перестроенной сетки представлен на рисунке 2.

Граничные условия

При расчете были приняты следующие граничные условия.

1) Коэффициент трения.

Приняли скольжение с коэффициентом трения $\mu=0,3$ (сталь по стали при холодной деформации).

На поверхностях контакта заготовки с пуансоном и упором принималась модель сухого Кулоновского трения вида:

$$\mu = f_D + (f_S - f_D) e^{-DS \cdot v}, \quad (2)$$

где f_D – динамический коэффициент трения;

f_S – коэффициент трения покоя;

DS – экспоненциальный коэффициент разрушения (принимался равным 0);

v – относительная скорость контактирующей поверхности.

В итоге при $DS=0$ зависимость коэффициента трения

$$\mu = f_S \quad (3)$$

2) Жёсткость системы *инструмент-заготовка*.

При моделировании процесса инструменты считались абсолютно жесткими, так как использование модели жесткого тела (ЖТ) для определения недеформируемой (малодеформируемой) части конечной элементной модели при выполнении явного анализа может существенно уменьшить время вычисления. Точность расчёта, при этом, пострадать не должна.

Анализ полученных результатов и оценка достоверности (адекватность)

Графическое отображение и анализ полученных расчетных значений, производится в постпроцессоре DEFORM, и предоставляет широкие возможности для анализа.

На рисунке 3 представлены диаграммы сравнения зависимостей усилия отрезки – P_{OT} от усилия осевого прижима - P_{OC} для стали 15 и стали 45, полученные экспериментальным путем (сплошная линия) и рассчитанные в DEFORM (пунктирная линия).

Оценка достоверности результатов теоретического расчета была осуществлена с погрешностью $\pm 15\%$ (для доверительного интервала ($\delta = 15\%$)) с вероятностью 0,85 для нормального распределения при известном (вычисленном) σ [4].

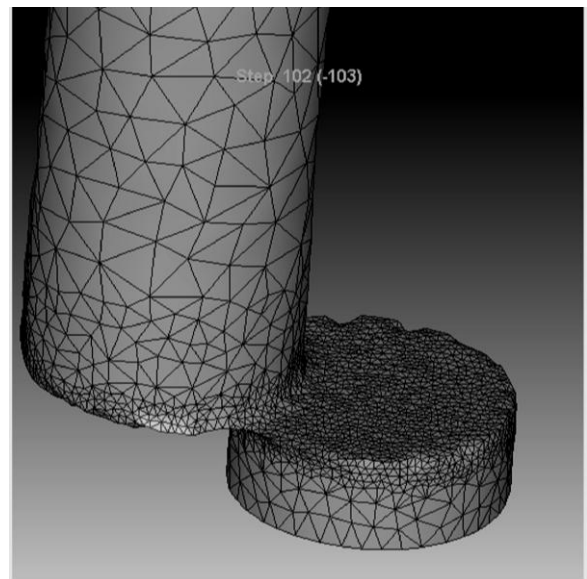


Рисунок 2 – Пример перестроенной сетки

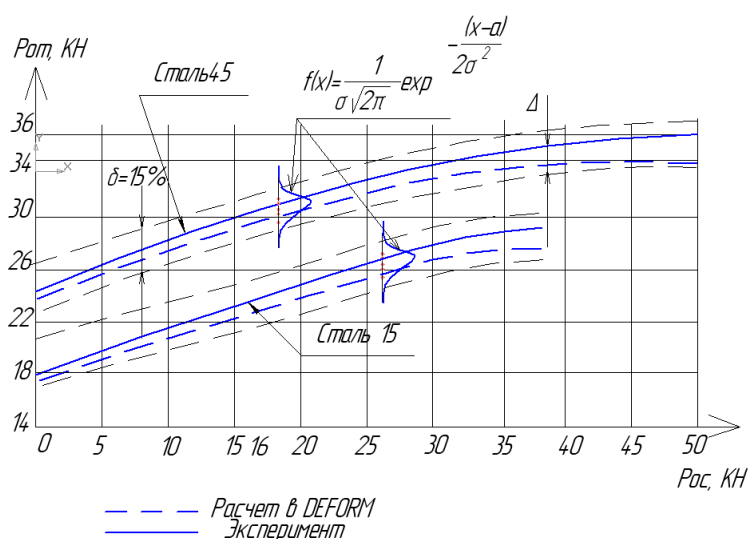


Рисунок 3 – Диаграмма сравнения результатов расчёта с данными эксперимента в доверительном интервале $\delta=15\%$

роны от экспериментальных кривых (на рисунке 3 толстая сплошная) откладывалось по 7,5% от номинального значения, строился доверительный интервал (тонкий пунктир), и проводилась оценка достоверности результатов аналитического расчета.

В результате проведенной оценки достоверности результатов аналитического расчета была установлена адекватность разработанной модели и методики определения технологических параметров отрезки в состоянии всестороннего сжатия путем расчета в DEFORM-3D реальному процессу. Полученные расчетные зависимости для всех вирируемых в расчетах параметрах попадали в доверительный интервал.

На всех полученных диаграммах между экспериментальными и расчетными данными наблюдалось расхождение $\Delta = f(\lambda)$. Для сталей 15 и стали 45 расхождение $\Delta = f(\lambda)$ представлено на рисунке 4. Значимость этого расхождения оценить сложно, поскольку выбранная методика измерения усилий не позволяет однозначно трактовать, обусловлено ли расхождение данных погрешностью при измерениях или эта погрешность обусловлена расчетом.

По результатам анализа можно сделать следующие выводы:

1. Расчет в пакете DEFORM процесса отрезки в состоянии всестороннего сжатия при

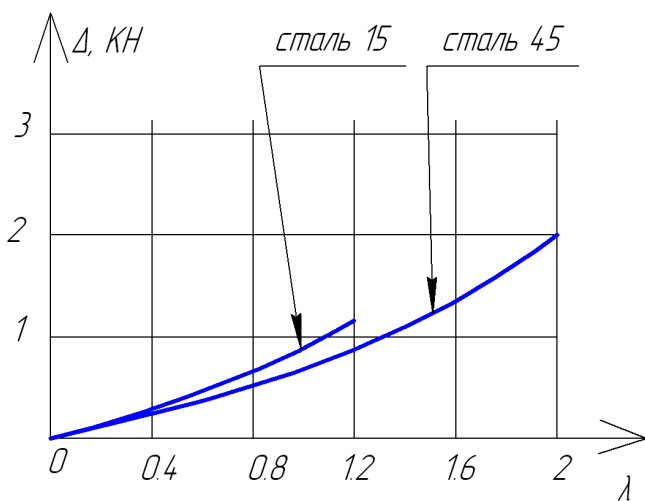


Рисунок 4 – Графики расхождение между экспериментальными и расчетными данными (λ – эксперимент; Δ – погрешность расчёта)

Для оценки среднего значения измеряемых параметров использовалась функция распределения (кривая Гаусса) вида:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

где a – измеряемая величина (теоретическая);

x – измеренная величина (экспериментальная);

σ – дисперсия значений x .

Затем через средние значения точек, полученных расчетом, по методу наименьших квадратов проводились кривые (на рисунке 3 толстый пунктир), а в обе стороны от экспериментальных кривых (на рисунке 3 толстая сплошная) откладывалось по 7,5% от номинального значения, строился доверительный интервал (тонкий пунктир), и проводилась оценка достоверности результатов аналитического расчета.

варьировании степенью сжатия, характеризуемой коэффициентом λ , дает результаты, с вероятностью 7,5% совпадающие с экспериментом. Это является достаточным условием для доказательства адекватности результатов моделирования отрезки в DEFORM реальному процессу.

2. Степень отклонения расчета от эксперимента носит закономерный характер и поддается описанию. Для разных металлов эта степень имеет различное значение, что дает основание считать, что отклонение обусловлено незначительной ошибкой при моделировании. Таким образом, на основании полученной зависимости погрешности Δ , ее можно использовать как поправку к результатам моделирования отрезки в DEFORM.

$$P(\lambda) = P_{отр}(\lambda) + \Delta(\lambda), \quad (5)$$

где $P(\lambda)$ – экспериментальное значение величины усилия отрезки как функция от степени сжатия λ ;

$P_{отр}(\lambda)$ – рассчитанное в DEFORM значение величины усилия отрезки, как функция от степени сжатия λ ;

$\Delta(\lambda)$ – поправка к расчету в DEFORM значение величины усилия отрезки как функция от степени сжатия λ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркин, Н.И. Исследование процесса отрезки точных коротких заготовок [Текст] / Н.И.Маркин, С.Ю.Радченко, А.В.Филина // Заготовительные производства в машиностроении, № 3, 2003 г.
2. Гун, Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением [Текст]. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с., ил.
3. Голенков, В.А. Математическое моделирование процессов обработки материалов давлением [Текст] / В.А. Голенков, В.И. Кондрашов, З.П. Зыкова – М.: Машиностроение, 1994. – 272 с., ил.
4. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с., ил.

Маркин Николай Иванович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры "Автопласт"
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Телефон 89202880801
E-mail: nim2004@mail.ru

Кравцова Эльвира Алексеевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Старший преподаватель кафедры "Информационные технологии"
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Телефон 89208014922
E-mail: elvira_kravtsova@mail.ru

Москвитин Сергей Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры "Автопласт"
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
телефон: (4862) 41-98-35
E-mail: viruss@mail.ru

Капырин Константин Игоревич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Автопласт"
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
телефон: (4862) 41-98-35
E-mail: kostya2257@inbox.ru

Фёдоров Тимофей Васильевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Автопласт"
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
телефон: (4862) 41-98-35
E-mail: TimofeyFedorov@rambler.ru

УДК 621.91.002

В.Б. ПРОТАСЬЕВ, В.В. ИСТОЦКИЙ, А.Н. ТАЛДЫКИН

ОБРАБОТКА ФРЕЗЕРОВАНИЕМ ДЕКОРАТИВНЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В статье рассматривается способ обработки винтовых поверхностей с помощью кривошипно-шатунного механизма. Показаны результаты профилирования с использованием возможностей 3D-моделирования.

Ключевые слова: фрезерование, винт, кинематика, винтовая поверхность.

In article the way of processing of screw surfaces with the help кривошипно-шатунного the mechanism is considered(examined). Results of profiling with use of opportunities of 3D-modelling are shown.

Key words: milling, the screw, kinematics, screw surface.

При производстве мебели, постройке деревянных домов, украшении интерьеров с давних времен используются винтовые декоративные поверхности.

Это винтовые колонны на крыльцах теремов, различные подпорки и стойки, ножки стульев, столов и многие другие.

К точности формы этих деталей не предъявляется высоких требований, и это дает возможность для использования более простых способов их профилирования.

Винтовая поверхность [1] может формировать различными способами:

– по профильной схеме (точением или фрезерованием) при перемещении фасонного инструмента относительно оси вращающейся заготовки;

– по генераторной схеме (точением или фрезерованием), когда производящая поверхность инструмента и детали имеют точечный, а не линейный контакт. При этом используется простой по форме режущий инструмент, который перемещается в двух направлениях относительно оси вращающейся заготовки:

1. в поперечном направлении, где формируется торцовое сечение винтовой поверхности;

2. в продольном направлении с целью формирования заданного шага винтовой поверхности.

Первый способ общеизвестен, второй поясняется рисунком 1.

Заготовка 1 вращается с равномерной частотой n_1 , высокой при точении, низкой при фрезеровании. Поперечная подача неравномерная – она обеспечивает форму поперечного сечения А-А (рисунок 1а, 1б) либо за счет устройства ЧПУ, копировального механизма либо иного устройства.

Кроме того, поперечное сечение А-А, сохраняя свою форму, должно не только вращаться вместе со шпинделем станка, но и на каждом новом обороте заготовки (рисунок 1в) совершать дополнительный доворот на угол $\Delta\varphi$, относительно предыдущего положения.

Это условие обеспечивает образование винтовой поверхности. При $\Delta\varphi=0$ будет образовываться цилиндрическая поверхность с сечением А-А.

За один оборот поперечного сечения ($\Delta\varphi=360^\circ$) формируется участок винтовой поверхности с шагом Р.

По такому принципу работают токарные гидрокопировальные станки фирмы “Mauser Schaeerer” [2], но их недостаток в том, что передние γ и задние α углы резцов изменяются (рисунок 1а) и по данным этой же фирмы изменение не должно превышать $25^\circ \dots 30^\circ$. Это ограничение резко снижает производительность, т.к. скорость резания приходится уменьшать.

Фрезерование лишено этого недостатка (рисунок 1б) и априорно является более производительным процессом.

Авторы, используя декоративное назначение винтовых поверхностей, предлагают для формирования поперечного сечения А-А (рисунок 1б) использовать хорошо технически отработанный кривошипно-шатунный механизм.

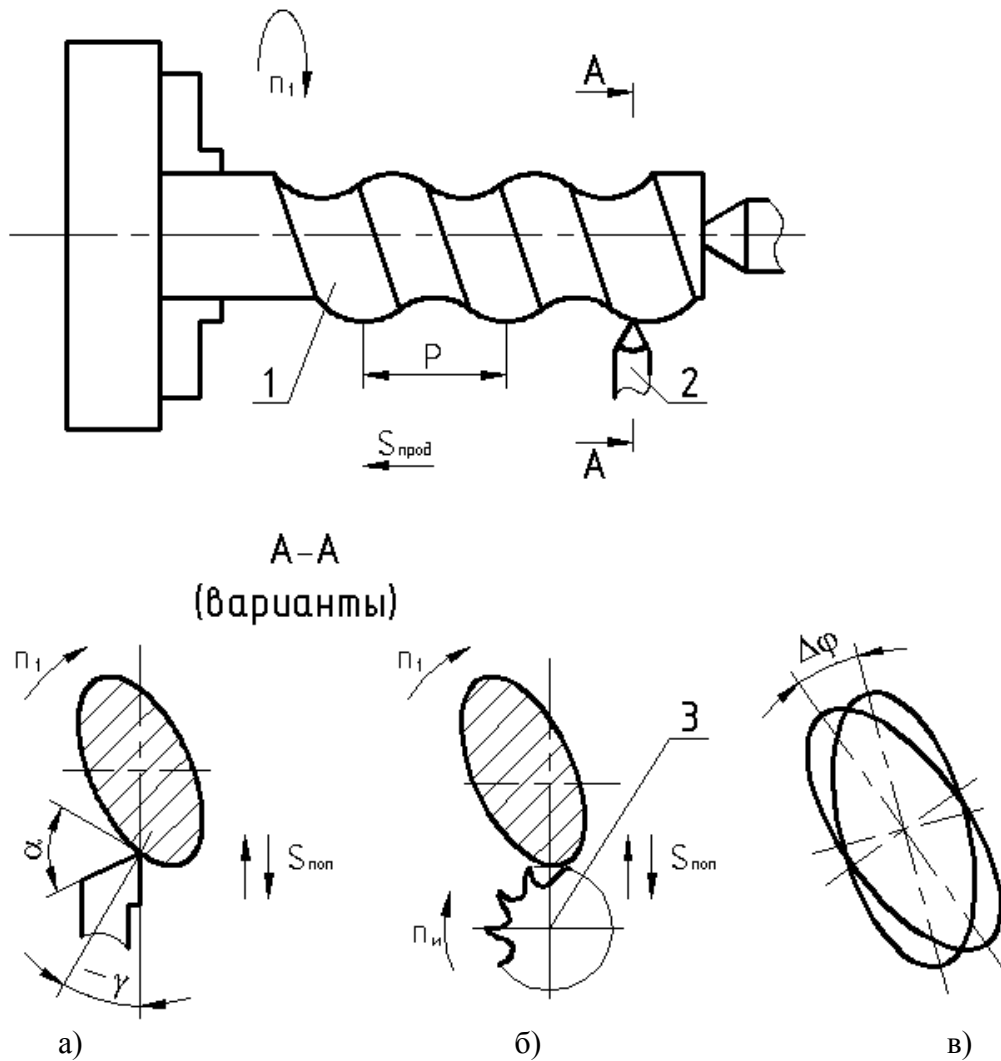


Рисунок 1 – Формирование декоративной винтовой поверхности по генераторной схеме

Кинематика предлагаемого устройства приведена на рисунке 2.

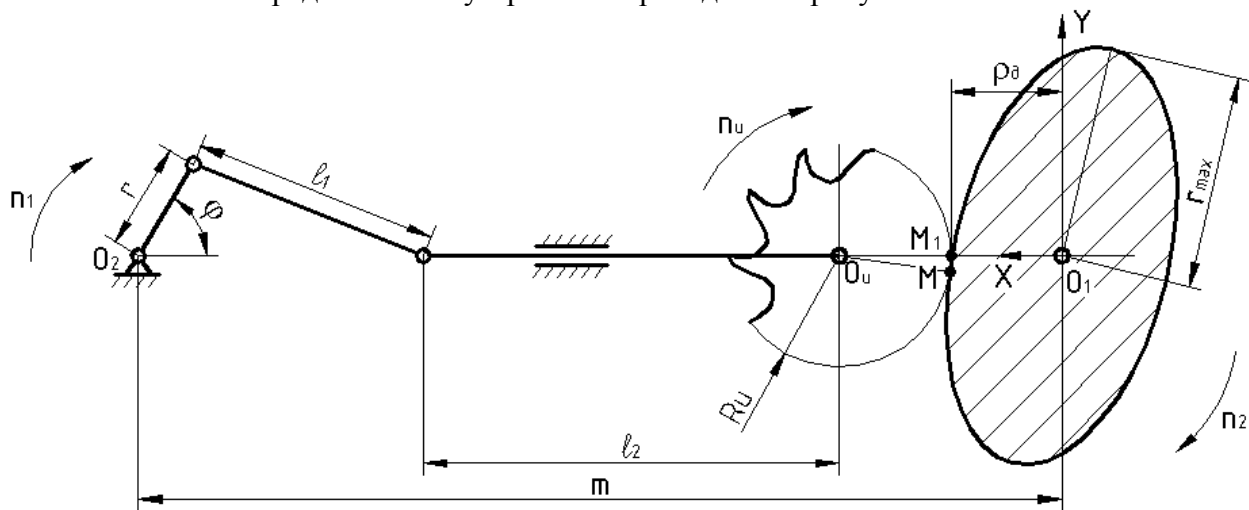


Рисунок 2 – Формирование поперечного сечения винтовой поверхности кривошипно-шатунным механизмом

Вращение кривошипа с радиусом r , который можно изменять при настройке (также как межосевое расстояние m и радиус фрезы R_u), перемещает центр фрезы O_u по овальной траектории. При одинаковой частоте вращения заготовки n_1 и кривошипа n_2 ($n_1=n_2$) на заготовке формируется прямой цилиндр с овальным сечением, который тоже может найти деко-

ративное применение. Если же $n_1 \neq n_2$, что обеспечивается настройкой гитары, соединяющей оси на которых расположены центры O_1 и O_2 , происходит закручивание поперечного сечения, и при наличии продольной подачи $S_{\text{прод}}$ (рисунок 1) формируется винтовая поверхность с овальным поперечным сечением.

Учитывая декоративное назначение получаемых винтовых поверхностей, можно использовать приближенную схему расчета поперечного сечения. Упрощение состоит в том, что определяется не положение точки M (рисунок 2), а положение точки M_1 , расположенной на линии межосевого расстояния m . Положение точки M , образованной касанием окружности с радиусом R_n , теоретически точное, а положение точки M_1 приближенное, но достаточное для выполнения анализа получаемого сечения.

Величина радиуса ρ_δ для точки M_1 определится выражением:

$$\rho_\delta = m - r \cdot \cos\varphi - l_1 \cdot \cos\beta - l_2 - R_u \quad (1)$$

где

$$\sin\beta = \frac{r \cdot \sin\varphi}{l_1} \quad (2)$$

φ – угол поворота кривошипа с радиусом r (величина r может при необходимости изменяться);

m – межосевое расстояние;

l_1, l_2 – размеры звеньев механизма;

R_n – радиус фрезы, используемой для обработки винтовой декоративной поверхности.

Угол поворота обрабатываемой детали

$$\delta = \varphi \cdot i \quad (3)$$

где i – передаточное отношение между шпинделем и валом кривошипа.

Направляющая линия винтовой поверхности, формируемая вершиной фрезы (массив точек M_1) определяется формулами:

$$\begin{cases} \rho_\delta = f(\varphi) \\ \delta = \varphi \cdot i \\ z = p \cdot \varphi \end{cases} \quad (4)$$

Первая формула в системе уравнений (4) тождественна формуле (1), а формула для определения z включает винтовой параметр p обрабатываемой детали.

Величина p определяется следующим образом. За один оборот заготовки продольная подача фрезы составляет величину S_0 , а дополнительный поворот заготовки составляет величину $\Delta\varphi$, поэтому винтовой параметр p определится зависимостью:

$$p = \frac{S_0 \cdot 180}{\Delta\varphi \cdot \pi} \quad (5)$$

Величина $\Delta\varphi$ измеряется в градусах.

Шаг этой винтовой поверхности P будет равен расстоянию, пройденному точкой O_2 (рисунок 2) до момента с которого начнется повторяемость цикла формирования винтовой поверхности. Этот параметр обеспечивается кинематикой обычного токарного станка.

Для наглядного представления формы формируемой винтовой поверхности на кафедре “Инструментальные и метрологические системы” ТулГУ разработана компьютерная программа, позволяющая формировать 3D модели винтовых поверхностей описанным способом.

На рисунке 3 показаны варианты 3D моделей винтовых поверхностей при различных значениях параметров кинематической цепи.

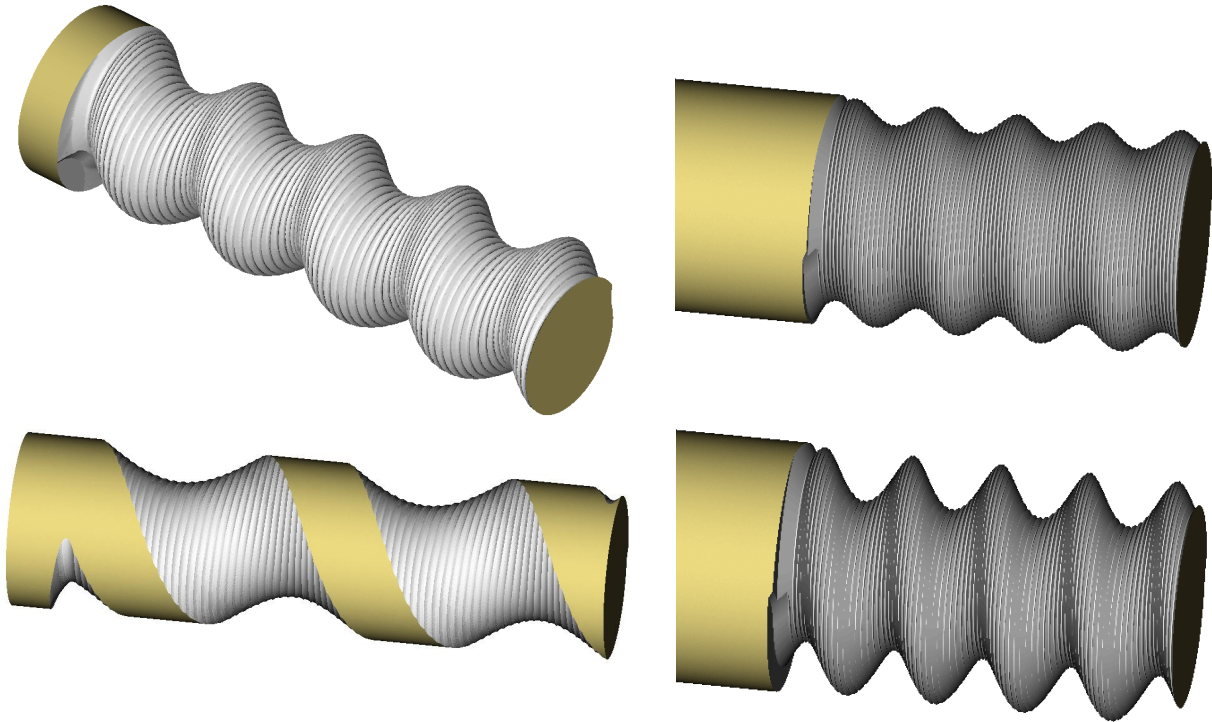


Рисунок 3 – Варианты 3D моделей, полученных при различных вариантах настройки кинематической цепи

При использовании в вышеописанном варианте вместо фрез шлифовальных кругов можно выполнять не только финишную обработку декоративных изделий, но и изготавливать более ответственные детали, например винтовые экструдеры, транспортирующие устройства и т.п.

Авторы предлагают (на взаимовыгодных условиях) заинтересованным лицам спроектировать на базе токарного станка с удлиненной станиной, фрезерный станок, работающий по описанному принципу. С предложениями обращаться на кафедру ИМС Тульского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лашнев, С.И. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: монография / С.И. Лашнев, А.Н. Борисов, С.Г. Емельянов. – Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 1997. – 391с.
2. Обточка некруглых деталей по копиру/ Проспекты токарных станков фирмы “Mayser Schaeerer”.

Протасьев В.Б.

Доктор технических наук, профессор
Тульский государственный университет

Истоцкий В.В.

Серпуховский инструментальный завод

Талдыкин А.Н.

Серпуховский инструментальный завод

УДК 629.114.4.01:678.026.345

В.Н. ХРОМОВ, В.Н. КОРЕНЕВ, А.Ю. РОДИЧЕВ

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЯ ПОД НАПЫЛЕНИЕ

Представлена технология для подготовки поверхности изделия под напыление, позволяющая повысить прочность сцепления напыленного слоя с основой за счет увеличения контактной и опорной поверхности основы, а также усталостную прочность деталей.

Ключевые слова: технология, подготовка поверхности, прочность сцепления, напыление.

The technology of preparation of a product surface for spraying is presented what allows to increase adhesive strength of sprayed layer with a basis due to extension of a contact and supporting surfaces of the basis and also to increase fatigue strength of details.

Key words: technology, preparation of surface, adhesive strength, spraying.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из путей повышения ресурса техники, снижения расхода запасных частей является внедрение в производство технологии упрочнения и восстановления деталей с использованием газопламенного напыления порошковых материалов. Однако, низкая прочность сцепления основного и дополнительного металла, необходимость тщательной подготовки поверхности перед напылением, сложность механической обработки, сдерживает широкое внедрение газопламенного напыления в производство.

Известно, что одним из наиболее эффективных способов подготовки поверхностей деталей машин под газопламенное напыление, обеспечивающим значительное повышение прочности сцепления покрытия с подложкой, является накатывание на восстанавливаемой или упрочняемой поверхности заготовки резьб с замковым профилем [1, 2].

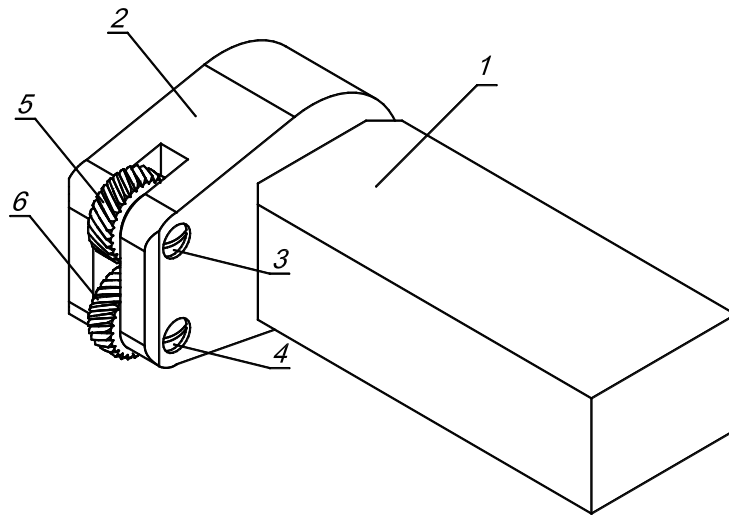
Недостатком известной технологии является неполное заполнение замкового профиля напыляемым материалом, что приводит к снижению прочности сцепления покрытия с основой и снижению прочности самого покрытия образованию пустот в нанесенном покрытии.

Задачей разработки является повышение заполнения профиля напыляемым материалом при высокой прочности сцепления напыленного слоя с основой и усталостной прочности детали.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поставленная задача достигается тем, что в существующей технологии, заключающейся в том, что после нарезания «рваной» резьбы на детали дополнительно проводят операцию деформирования вершин «рваной» резьбы, согласно разработке, деформирование вершин «рваной» резьбы проводят косым сетчатым накатыванием на поверхности роликами с выфрезерованными на поверхности треугольными зубьями с закругленными вершинами и впадинами, расположенными под углом 30° к оси ролика и направленными у одного ролика вправо, а у другого влево.

Устройство для подготовки поверхности изделия под напыление (рисунок 1) содержит ручку 1 с установленным на ней неподвижно роликодержателем 2, в прорезях которого на осях 3 и 4, параллельных оси изделия, по свободной посадке установлены накатные ролики: правый 5 и левый 6, с выфрезерованными на поверхности треугольными зубьями с закругленными вершинами и впадинами, расположенными под углом 30° к оси ролика и направленными у одного ролика вправо, а у другого влево.



**Рисунок 1 – Общий вид устройства, реализующего предлагаемую технологию:
1 – ручка, 2 – роликoderжатель, 3 и 4 – оси, 5 и 6 – ролики, правый и левый соответственно**

Технология подготовки поверхности изделия под напыление осуществляется следующим образом.

Изношенная поверхность упрочняемой, восстанавливаемой или защищаемой от коррозии детали предварительно обрабатывается на токарном станке, на которую затем наносится «рваная» резьба (рисунок 2).

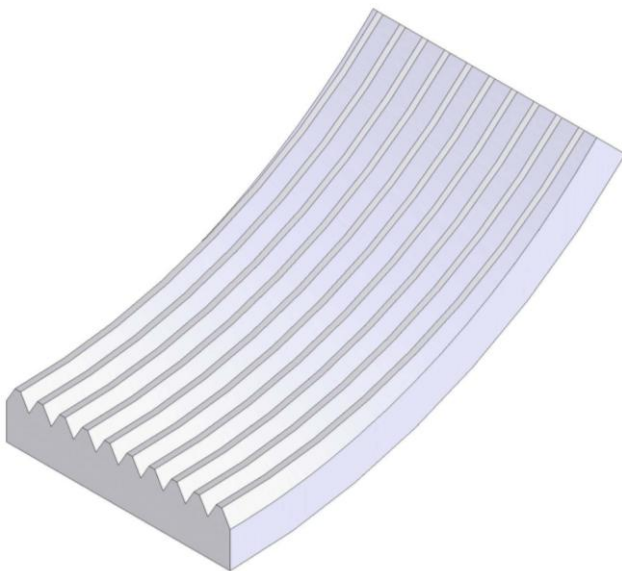


Рисунок 2 – Фрагмент поверхности с нарезанной «рваной» резьбой

После этого на «рваную» резьбу наносят косоое сетчатое рифление накатыванием роликами. Для этого устройство ручкой 1 устанавливают в резцедержатель станка под прямым углом к обрабатываемой «рваной» резьбе накатными роликами 5 и 6, треугольные зубья которых внедряют в вершины «рваной» резьбы. Врезание роликов на полную глубину осуществляется за 1÷2 об. детали без включения продольной подачи с минимальным числом оборотов шпинделя станка. Накатывание проводится за один проход с продольной подачей 2÷3 мм/об и окружной скоростью 15÷20 м/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При внедрении зубьев роликов 4 и 5 деформируются вершины резьбы, и деформированный металл течет внутрь от каждого зуба. В результате прохода инструмента по вершине резьбы образуется участки профиля с косоой сетчатой накаткой (рисунок 3), на которые в дальнейшем механически прикрепляется напыленный слой. Этот профиль выполняет роль дополнительной опорной и одновременно контактной поверхности. Активное сечение покрытия определяется площадью фила поверхности. Следовательно, в одном случае прочность сцепления лимитируется опорным действием профиля поверхности, а в другом - прочностью самого покрытия, определяемого его активным сечением. Механическое деформирование поверхностных слоев резьбы вызывает интенсивную активацию последних, которая также способствует повышению адгезии напыленного слоя с основой, но для полного использования этого эффекта напыление поверхности следует проводить непосредственно сразу после формирования поверхности данным способом

После подготовки поверхности предлагаемым способом осуществляют операцию газопламенного напыления порошковых материалов с помощью горелки. Поскольку при газопламенном напылении применяются порошки с диаметром частиц 40 мкм, а частицы порошка имеют высокую скорость при взаимодействии с деталью, достигается практически полное заполнение рельефа. Нанесенный газопламенным напылением слой оплавляется с помощью горелки, что особенно способствует заполнению покрытия профиля, повышает прочность сцепления, снижает пористость и повышает твердость покрытия.

ВЫВОД

Использование предлагаемой технологии позволяет повысить заполнение профиля напыляемым материалом, за счет упрощения профиля поверхности подготовленной основы, при высокой прочности сцепления напыленного слоя с основой и усталостной прочности деталей, за счет увеличения контактной и опорной поверхности основы.

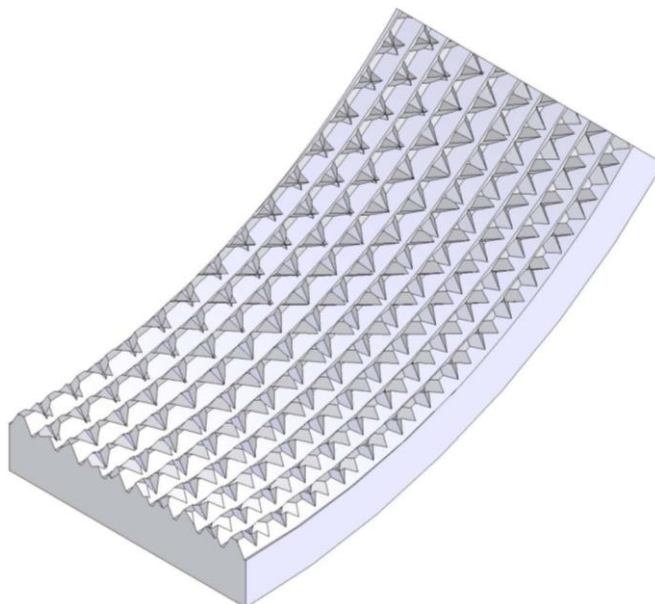


Рисунок 3 – Фрагмент поверхности с витками «рваной» резьбы с последующей кривой сетчатой накаткой

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2237525 Российская Федерация, МПК⁷ В05D 03/12. Способ подготовки поверхности изделия под напыление и устройство для его осуществления. [Текст]/В. Н. Корнев, В. Н. Хромов, В. В. Барабаш, К. В. Кулаков, С. А. Зайцев. - №2003119672; заявл. 30.06.2003; опубл. 10.10.2004 г. Бюл. №28. – 5 с.
2. Пат.2305606 Российская Федерация, МПК⁷ В05D 3/00 Устройство для подготовки поверхности изделия под напыление. [Текст]/В.Н. Корнев, В.Н. Хромов. - №2006105584; заявл. 22.02.2006; опубл.10.09.07 г. Бюл. №25 - 6 с.

Хромов Василий Николаевич

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Доктор технических наук, зав. кафедрой «Надежность и ремонт машин», профессор
Тел. +7(4862)43-19-79
E-mail: chrom@orel.ru

Корнев Владислав Николаевич

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин»
Тел.: +7(910)304-74-79
E-mail: korenev-vlad@list.ru

Родичев Алексей Юрьевич

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Мастер производственного обучения кафедры «Надежность и ремонт машин»
Тел. +7(4862)43-19-79
E-mail: alfox777@orel-dormash.ru

А.С. ЦЫНОВКИН, Д.Ю. ДУБРОВ, Ю.С. ДУБРОВ

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СБОРНЫХ РЕЗЦОВ ПУТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР

Предложен метод повышения износостойкости сборных резцов путем увеличения градиента температур. Это достигается применением высокотеплопроводного футляра, заполненного легкоплавким веществом, что снижает термическое сопротивление контакта и позволяет более эффективно использовать тепловые трубы для охлаждения резца.

Ключевые слова: температурный градиент, сборный резец, износостойкость, теплопроводность, тепловая труба.

The collapsible cutting tool wear resistance increasing method by the temperature gradient rise is offered. This result is reached with the help of case with enhanced heat conductivity fusible substance filled making thermal resistance to reduce and thermal pipes for cutter cooling more effectively to use.

Key words: temperature gradient, wear properties, thermal conductivity, heat pipe.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачей исследования является повышение износостойкости сборных резцов путем нетрадиционных методов охлаждения.

В условиях современного машиностроения постоянное повышение требований к качеству изделий заставляет более широко использовать конструкционные материалы, обладающие высокими эксплуатационными свойствами - коррозионной стойкостью, жаропрочностью, значительной удельной прочностью, а также рядом других свойств.

Однако данные материалы обладают низкой обрабатываемостью резанием, что приводит к существенному влиянию тепловых процессов на качество и точность обработки.

С целью перераспределения тепловых потоков в резце, а в частности, для более эффективного отвода теплоты от рабочих поверхностей, нами предложена следующая конструкция резца (рисунок 1).

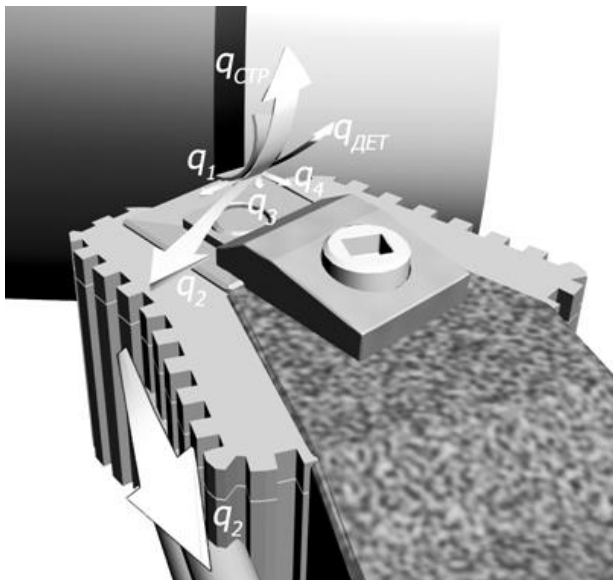


Рисунок 1 – Резец с высокотеплопроводным футляром, заполненным сплавом Розе

В конструкции применен выполненный из меди теплопроводный футляр, расположенный по рабочим поверхностям и заполненный сплавом Розе, для которого рассчитывается эквивалентный коэффициент теплопроводности ($\lambda_{экв}$) [1], равный 20 Вт/(м·К).

Особенностью данного сплава является низкая температура плавления (+94 °С), что при нагреве позволяет ему, расплавляясь, полностью заполнить внутреннее пространство футляра вытесняя воздух, имеющий чрезвычайно низкую теплопроводность.

В результате этого теплота, полученная в процессе резания, более эффективно передается в медь и путем конвективного теплообмена рассеивается в окружающую среду.

В работе [2] отмечается, что определяющим фактором, влияющим на интенсив-

ность изнашивания J_n , является градиент температур $\left[\frac{\partial T}{\partial x} \right]$ при $x=0$

$$J_n = \frac{mT_{II}^n}{g-1 \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} \psi v S_x - S_0}, \quad (1)$$

где T_{II} – максимальная поверхностная температура;

$\omega_0 = -mT_{II}^n$ ($m > 0$; $n > 0$) – объемная плотность теплового источника теплопоглощения; $g > 1$;

$\left[\frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0}$ – температурный градиент при $x = 0$; ψ – коэффициент;

S_x – критическая плотность энтропии (характеристика материала);

v – скорость трения.

Из формулы (1) следует, что при постоянной температуре контакта T_{II} интенсивность изнашивания J_n инструментального материала, находящегося в стационарном тепловом режиме, зависит от локализации теплового поля к поверхности контакта, т.е. от градиента температуры, и уменьшается при увеличении модуля $\text{grad } T(0)$.

Для построения картины распределения температур по задней поверхности резца применён метод сравнительного компьютерного моделирования. Для определения граничных условий в среде Mathcad разработана программа расчёта теплофизических характеристик установившегося режима резания инструментом без применения СОТС. Использована методика аналитического расчёта температур на контактных поверхностях инструмента [1] с учётом силовых параметров резания и коэффициента усадки стружки [3,4].

На рисунке 2(а-б) приведены распределения температур по задней поверхности стандартного резца и резца повышенной теплопроводности (ПТ), оснащённого сменной многогранной пластиной (СМП).

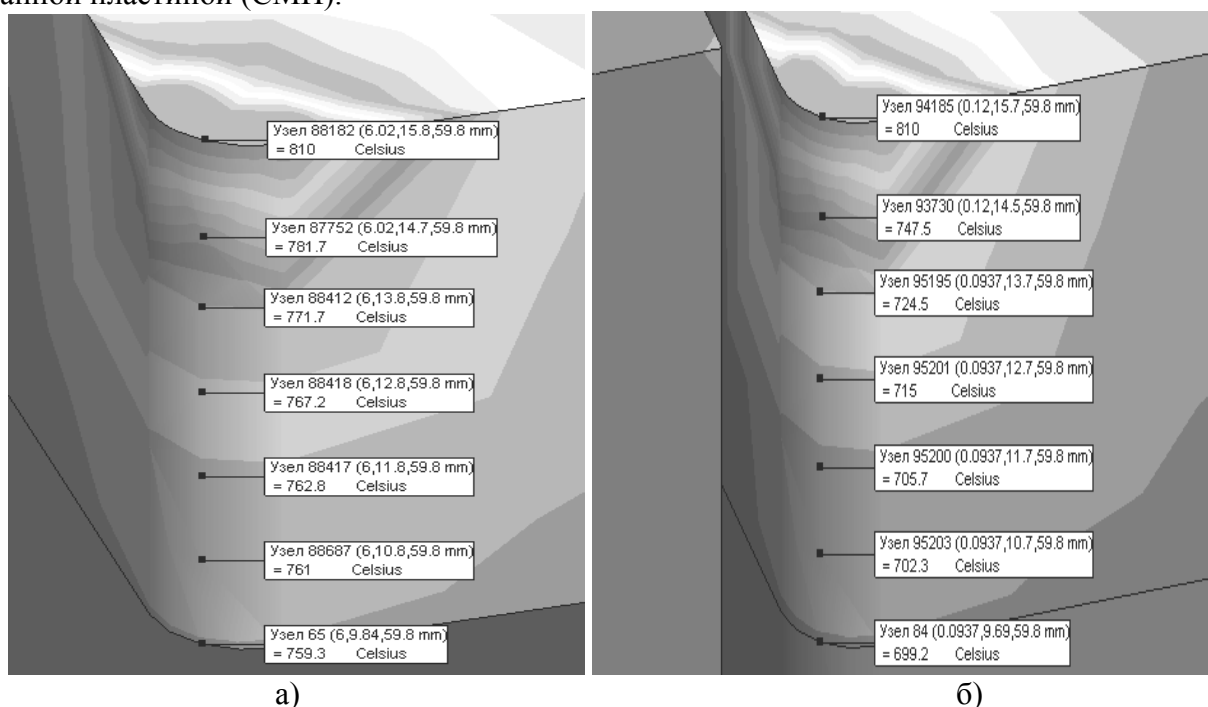


Рисунок 2 – Результаты распределения температур по задней поверхности а) стандартного резца; б) резца повышенной теплопроводности (110Г13Л – ВК8; $t=1\text{мм}$; $S=0,2\text{мм/об}$; $V=65\text{м/мин}$)

График распределения температур по задним поверхностям стандартного резца и резца повышенной теплопроводности по результатам моделирования представлен на рисунке 3.

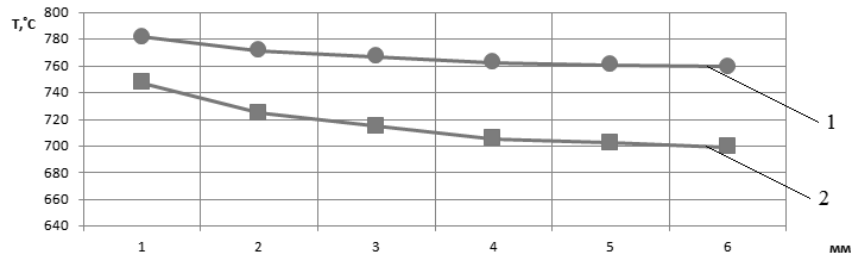


Рисунок 3 – График распределения температур по задним поверхностям стандартного резца (1) и резца повышенной теплопроводности (2)

Данные, полученные методом компьютерного моделирования, показывают увеличение градиента температур при использовании резца повышенной теплопроводности. Это было подтверждено сравнительными экспериментальными исследованиями износостойкости стандартных резцов и резцов ПТ при обработке титанового сплава ВТ3-1.

Обрабатываемый материал – титановый сплав ВТ3-1. Фотографии износа резцов выполнены при помощи цифрового микроскопа Webbers G50s с увеличением 200x (рис.4а-4б).

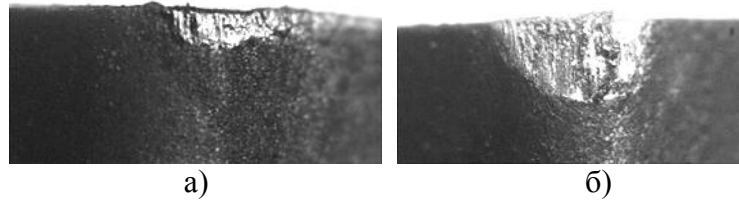


Рисунок 4 – Износ по задней поверхности
а) резец повышенной теплопроводности б) стандартный резец
(ВТ3-1 – ВК8; $t=0.5\text{мм}$; $S=0.1\text{мм/об}$; $V=50\text{м/мин}$; $\tau=36\text{ мин}$)

Как это видно из рисунков 4а, 4б и 5, изменение тепловых потоков в режущем клине резца повышенной теплопроводности приводит к снижению износа по задней поверхности инструмента.

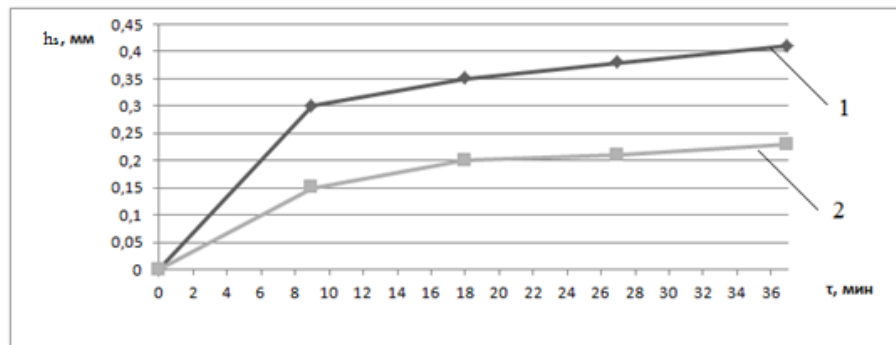


Рисунок 5 – Износ по задней поверхности h_z в зависимости от времени резания
(ВТ3-1 – ВК8; $t=0.5\text{мм}$; $S=0.1\text{мм/об}$; $V=50\text{м/мин}$)
1 – стандартный резец; 2 – резец повышенной теплопроводности

Таким образом, результаты проведенного компьютерного моделирования и экспериментальные исследования подтверждают благоприятное распределение тепловых потоков и температурных полей, вследствие чего повышается градиент температур в резцах предлагаемой конструкции, что влечёт за собой повышение износостойкости резцов ПТ до 2 раз. Износостойкость режущих инструментов может быть также существенно повышена (до 3-4-х раз) за счет применения эффекта испарительного охлаждения.

Установлено, что охлаждение испарением более эффективно, чем конвективное или пленочное в равнозначных системах. Так, применение испарительного охлаждения сопловых и рабочих турбинных лопаток позволило повысить температуру рабочего газа с $840\text{ }^\circ\text{C}$ до $1200\text{ }^\circ\text{C}$.

Применительно к технологическим системам испарительное охлаждение может быть реализовано двумя способами – открытым и закрытым, поэтому рассмотрим возможности

применения в технологических системах испарительного охлаждения открытого типа. Так как при этом используется скрытая теплота парообразования, то эффективность испарительного охлаждения значительно больше эффективности применения СОТС (СОЖ), подаваемых в зону резания традиционными методами. В качестве хладагента используется вода, которая через пористую структуру капельным способом поступает либо на нижнюю опорную поверхность режущей пластины, либо через пористый штифт на переднюю поверхность (рисунок 6а и 6б).

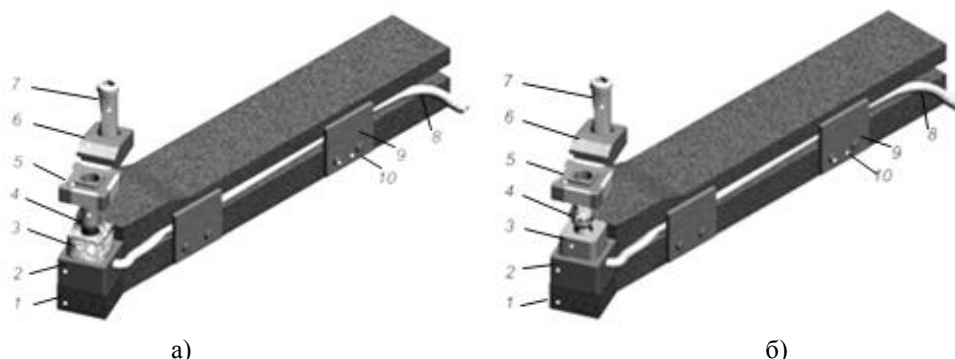


Рисунок 6 – Резцы с испарительным охлаждением открытого типа
 а) охлаждение нижней опорной поверхности СМП через пористую вставку – 3;
 б) охлаждение передней поверхности СМП через пористый штифт 4
 (1 – державка, 2 – опорная пластина, 5 – СМП, 6 – прижим-стружколом, 7 – винт, 8 – пористая трубка, 9 – планка, 10 – болт)

Проведенные в дальнейшем экспериментальные исследования эффективности испарительного охлаждения резцов показали повышение износостойкости до 2,5 раз. Обработка высокомарганцовистой стали 110Г13Л осуществлялась резцами, оснащенными СМП (ВК8). На рисунках 10 – 12 приведены фотографии износа (цифровой микроскоп Webbers G50S с увеличением 200х).

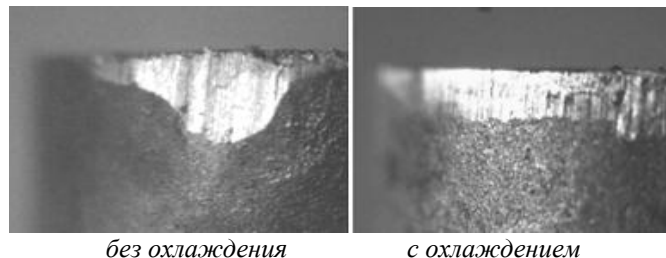


Рисунок 8 – Фотографии износа $t=1\text{мм}$, $S=0,1\text{мм/об}$, $V=78,5\text{м/мин}$, $\tau=4,4\text{мин}$

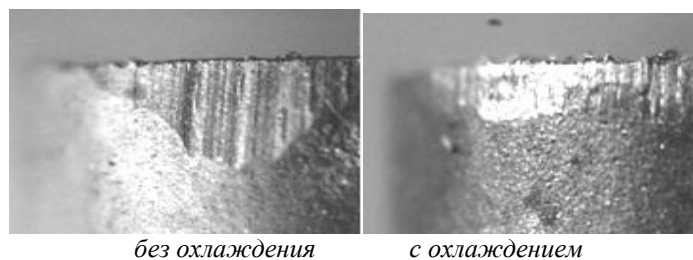


Рисунок 9 – Фотографии износа $t=1\text{мм}$, $S=0,1\text{мм/об}$, $V=78,5\text{м/мин}$, $\tau=8,7\text{мин}$

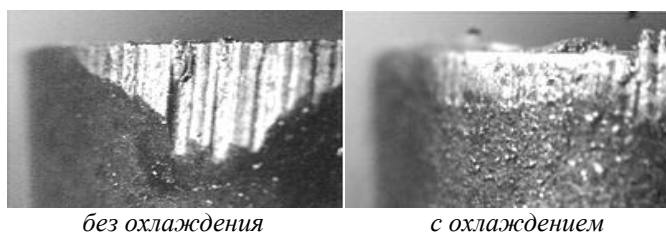


Рисунок 10 – Фотографии износа $t=1\text{мм}$, $S=0,1\text{мм/об}$, $V=78,5\text{м/мин}$, $\tau=13,1\text{мин}$

Цветные изображения (на мониторе компьютера) изношенных задних поверхностей пластин позволяют по цветам побежалости судить о существенном различии контактных температур.

Таким образом, управляя тепловыми потоками, можно регулировать физические процессы, протекающие в экстремальных условиях трибологического контакта «инструмент-заготовка».

Повышение градиента температур в сборных резцах также может быть успешно реализовано за счет использования тепловых труб (ТТ), которые относятся к устройствам, где передача теплоты в результате перехода хладагента в другое агрегатное состояние осуществляется в закрытом режиме. Такой тип автономного охлаждения успешно испытан авторами в лабораторных и производственных условиях и подробно описан в литературе [5,6].

Долю тепла, поступающего в резец, определим по методике, изложенной в [1].

$$\delta = \frac{4 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda_p}{\sqrt{\frac{V}{60} \cdot S \cdot 10^{-3} \cdot \sin(\varphi) \cdot \lambda}} \quad (2)$$

где δ – доля тепла, поступающего в резец;

V, S – скорость резания и подача;

λ_p, λ – коэффициенты теплопроводности инструментального и обрабатываемого материала;

φ – угол в плане.

Величина теплоты, поступающей в резец, зависит от сочетания коэффициентов теплопроводности инструментального и конструкционного материала, от режимов резания и геометрических параметров инструмента.

Зная величину теплоты, поступающей в резец, количество тепла $Q_{ТТ}$ (Вт), отдаваемого стенками ТТ, в жидкость, определяется :

$$Q_{ТТ} = \alpha_1 \cdot S_1 \cdot \theta_{S1} - \theta_H \quad , \quad (3)$$

где $\alpha_1, S_1, \theta_{S1}$ – коэффициент теплоотдачи, площадь поверхности и температура в зоне нагрева ТТ соответственно.

Количество теплоты, передаваемого радиатором в окружающую среду $Q_{рад}$ равно, Вт

$$Q_{рад} = \frac{\Delta T \cdot F_B}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{рад}} + \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{F_B}{F_M + \eta_p \cdot F_p} \right)} \quad , \quad (4)$$

где ΔT – разность температур между температурой насыщения жидкости внутри тепловой трубы и окружающей среды;

α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи в зоне охлаждения и воздуха соответственно;

$\lambda_{рад}$ – коэффициент теплопроводности рёбер радиатора;

η_p – коэффициент эффективности рёбер радиатора;

F_M – площадь межрёберных участков; F_p – площадь рёбер радиатора;

$F_в$ – площадь внутренней поверхности зоны охлаждения, м².

Авторами выполнены оптимизационные расчеты основных размеров тепловой трубы. При этом использовалась методика расчёта тепловой трубы, предложенная А.Н. Резниковым [1]. Критериями оптимизации являлись:

- максимизация теплового потока внутри ТТ (q_1);
- максимизация количества теплоты, которое ТТ отдаёт в теплоноситель (Q);
- снижение температуры на наружной поверхности зоны нагрева ТТ.

В результате расчетов были определены следующие параметры ТТ: d_n – наружный диаметр; h_1 – длина зоны нагрева; h_2 – длина зоны охлаждения; форма и размеры радиатора.

Этим параметрам соответствуют тепловые трубы фирмы Thermaltake, которые в дальнейшем использовались нами в конструкциях сборных резцов (рисунок 11а и 11б)

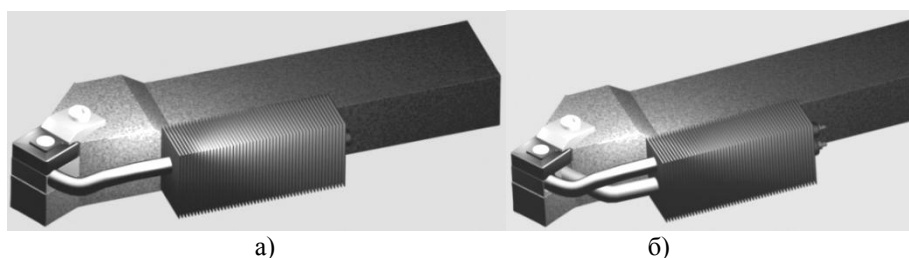
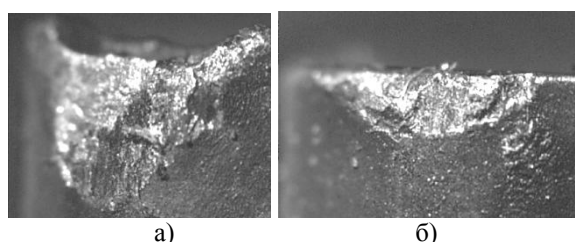
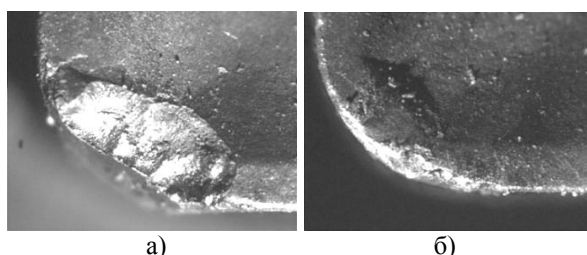


Рисунок 11 – Сборные резцы с одной (а) и двумя (б) тепловыми трубами

На рисунках 12 и 13 приведены сравнительные фотографии износа СМП, анализ которых показывает значительные преимущества испарительного охлаждения закрытого типа при помощи тепловых труб (110Г13Л – ВК8; $t = 1\text{ мм}$; $S = 0,3\text{ мм/об}$; $V = 52\text{ м/мин}$; $\tau = 5,4\text{ мин}$).



*Рисунок 12 – Износ по задним поверхностям
а) – резание без охлаждения; б) – с охлаждением двумя ТТ*



*Рисунок 13 – Износ по передним поверхностям
а) – резание без охлаждения; б) – с охлаждением двумя ТТ*

Расчеты показывают, что количество тепла, поступающего в режущий клин при чистовой обработке различных по твердости материалов, примерно лежит в пределах от 5 до 150 Вт. Для отвода такого количества тепла необходима определенная геометрия тепловой трубы и система охлаждения радиатора. Для чистовой обработки достаточен радиатор, охлаждаемый естественной конвекцией. Применение ТТ с пористой структурой позволит создавать наиболее эффективные в эксплуатации сборные резцы.

Полученные нами экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что применение ТТ целесообразно при чистовой обработке низкотеплопроводных конструкционных материалов и при получистовой обработке деталей, изготавливаемых из обычных конструкционных сталей и чугунов. На повышенных режимах резания целесообразно применение резцов с двумя тепловыми трубами. Применение ТТ позволяет отказаться от использования СОЖ при чистовой обработке и тем самым повысить экологическую безопасность рабочего места, а также сэкономить на покупке дополнительного оборудования, систем вентиляции, утилизации и т.д.

Полученные нами результаты показывают, что дальнейшее увеличение градиента температур возможно за счет более благоприятного управления тепловыми потоками в режущей пластине, которое может быть обеспечено снижением контактного термического сопротивления в резце повышенной теплопроводности с футляром, заполненным легкоплавким сплавом, в сочетании с эффективным теплоотводом при помощи тепловых труб (рисунок 14).

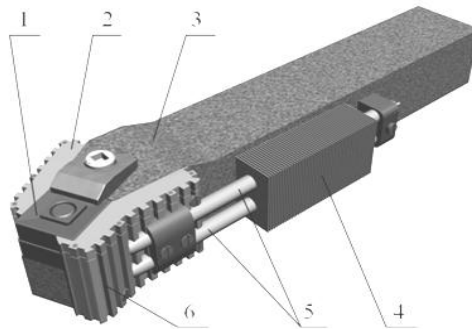


Рисунок 14 – Сборный резец ПТ, оснащенный ТТ
 1 – СМП; 2 и 6 – правая и левая медные накладки, заполненные легкоплавким сплавом; 3 – державка; 4 – радиатор; 5 – ТТ

Таким образом, управляя тепловыми потоками, можно регулировать физические процессы, протекающие в экстремальных условиях трибологического контакта «инструмент-заготовка».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288с.
2. Рыжкин, А.А. О влиянии параметров температурного поля на трибологические характеристики пары трения / А.А. Рыжкин // Вестник ДГТУ, 2005. Т.5. №3 (25).
3. Силин, С.С. Метод подбора при резании металлов / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
4. Юдина, Т.Д. К вопросу о расчётном определении коэффициента усадки стружки / Т.Д. Юдина // Производительная обработка и технологическая надёжность деталей машин: межвузовский сборник научных трудов. – №8. – Ярославль, 1979. – С. 18 – 22.
5. Yu.S. Dubrov, D.Yu. Dubrov, G.S. Nikolaeva On the issue of heat pipe application in metal- working technological systems Proceedings of the VII Minsk International Seminar. His scientific association «Heat pipes» National Academy of sciences of Belarys Luikov heat mass transfer Institute Belarusion National Technical university – Minsk, 2008.
6. Дубров, Д.Ю. Повышение эффективности процесса резания путем регулирования теплоотвода / Д.Ю. Дубров, А.С. Цыновкин // Известия ОрёлГТУ. – 2009. – №2-3/274(560) стр.17– 158с.

Цыновкин Александр Сергеевич

Ростовская-на-Дону академия сельскохозяйственного машиностроения, г. Ростов-на-Дону
 Аспирант кафедры «Технология автоматизированного машиностроения»
 Тел. (863) 211-08-35
 E-mail: greyfox@list.ru

Дубров Дмитрий Юрьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону
 Аспирант кафедры «Основы проектирования машин»
 Тел. (863) 234-08-11
 E-mail: DUS@fromru.com

Дубров Юрий Семёнович

Ростовская-на-Дону академия сельскохозяйственного машиностроения, г. Ростов-на-Дону
 Профессор кафедры «Технология автоматизированного машиностроения», кандидат технических наук, доцент
 Тел. (863) 232-08-19
 E-mail: DUS@fromru.com

М.П. ШИШКАРЕВ

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ 1-ГО ПОКОЛЕНИЯ

На примере адаптивной фрикционной муфты с бифункциональным управляющим устройством показано преимущество совмещения функций нажимного и управляющего устройства, осуществляемых одним механизмом. Показано, что ограничения величины коэффициента усиления и числа пар трения нет, когда пружины расположены относительно оси вращения муфты на расстоянии, равном среднему радиусу поверхностей трения или большим его.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, управляющее устройство, точность срабатывания, коэффициент усиления.

On an example of an adaptive frictional clutch with the bifunctional actuation device advantage of combination of functions press and the actuation device, realised by one mechanism is displayed. It is displayed, that limitation of magnitude of an amplification factor and number of pairs a friction is not present, when springs are located concerning an axis of rotation of a clutch on the distance equal to average radius of surfaces of a friction or big it.

Key words: an adaptive frictional clutch, the actuation device, exactitude of operation, an amplification factor.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Адаптивные фрикционные муфты (АФМ) 1-го поколения, выполненные по схеме муфты Н.Д. Вернера [1], обладают относительно невысокой надежностью работы. Для АФМ критерием надежности служит точность срабатывания, которая определяет уровень стабильности вращающего момента при случайном изменении величины коэффициента трения [2].

Принципиально АФМ 1-го поколения могут обладать высокой точностью срабатывания, когда коэффициент точности становится близким к единице. Такой вариант рассмотрен в работе [3], однако достигается это путем значительного увеличения (до 16 единиц) коэффициента усиления (КУ) обратной связи, что приводит к резкому уменьшению величины вращающего момента муфты. Необходимость восстановления прежнего значения вращающего момента, соответствующего настроечному значению, требует увеличения габаритных размеров и массы муфты, практически пропорционального возрастанию величины КУ [4].

АФМ с дифференцированными парами трения типа «ведущая пара – ведомые пары» имеет ограничение величины КУ, которое, соответственно, ограничивает точность срабатывания муфты [5].

Многочисленные конструктивные варианты АФМ 1-го поколения созданы по единой схеме и не вносят сколько-нибудь существенных отличий, в том числе в плане повышения точности срабатывания. Принципиально новых решений, кроме управляющего устройства (УУ) с переменным КУ, величина которого функционально зависит от коэффициента трения [6], нет. В последнее время это дало повод считать разработку данного направления бесперспективной. Действительно, в современных отечественных и зарубежных научно-технических изданиях отсутствует в последнее время информация о новых конструкциях и исследованиях АФМ, обладающих высокой надежностью работы.

Задачей исследования является синтез конструктивно-компоновочной схемы АФМ 1-го поколения с более эффективным использованием задающего воздействия нажимного узла и оптимизация ее конструктивных параметров.

Решение. Недостатком конструктивно-компоновочной схемы АФМ 1-го поколения является нерациональное использование силы натяжения нажимного упругого элемента. Распорная (отжимная) сила УУ действует в противоположном, относительно силы натяжения нажимного упругого элемента, направлении и уменьшает действие последнего на пары

трения фрикционной группы муфты. Соответственно этому компоновка АФМ 1-го поколения предусматривает расположение фрикционной группы между УУ и нажимным упругим элементом.

Реализация адаптивных свойств муфты при расположении УУ с внешней стороны нажимного диска (сумматора) и фронтальном действии нажимной пружины невозможна, поскольку в данном случае будет действовать положительная обратная связь, ухудшающая точность срабатывания муфты.

Если на нажимной диск будет действовать внешняя тангенциальная сила, то при расположении УУ с внешней стороны нажимного диска влияние вращающего момента вызовет появление осевой (относительно оси вращения муфты) силы как результат взаимодействия между телами качения и скосами гнезд. Указанная осевая сила осуществляет прижатие друг к другу пар трения и может быть больше, чем суммарная сила натяжения тангенциальных упругих силовых элементов, действующих на нажимной диск. Следовательно, в данном случае УУ является усилителем.

Принципиальная схема АФМ, в которой учтены сделанные замечания, показана на рисунке 1.

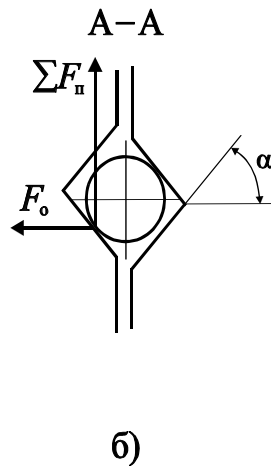
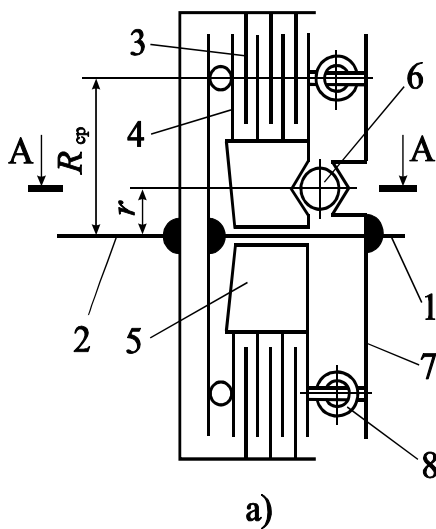


Рисунок 1 – Принципиальная схема АФМ

Полумуфты 1 и 2 связаны одна с другой фрикционной группой, состоящей из дисков трения 3 и 4. Диски 3 связаны с барабаном полумуфты 2, диски 4 – со ступицей нажимного диска 5, установленного с возможностью поворота относительно ступицы полумуфты 1.

Комбинированное (бифункциональное) УУ обратной связи выполнено в виде тел качения 6, которые размещены в скошенных гнездах нажимного диска 5 и опорного диска 7, жестко закрепленного на ступице полумуфты 1 (рисунок 1, сечение А-А).

Нажимной узел муфты выполнен из поставленных с предва-

рительным натяжением пружин 8, которые расположены тангенциально относительно элементов 5 и 7. Каждая пружина опирается одним концом на бобышку, закрепленную на нажимном диске 5, другим концом – на бобышку, закрепленную на опорном диске 7.

Осевая сила, осуществляющая прижатие друг к другу пар трения, при отсутствии нагрузки, передаваемой муфтой, равна:

$$F_0 = \frac{R}{r} \tan \alpha \sum F_n \quad (1)$$

где R – расстояние от оси вращения муфты до точки приложения тангенциальной силы к нажимному диску;

r – радиус окружности, на которой расположены тела качения (чувствительные элементы) УУ;

α – угол скоса гнезда УУ (рисунок 1, а);

$\sum F_n$ – суммарная осевая сила натяжения тангенциальных упругих силовых элементов.

Положим, что $R = nR_{ср}$ (где n – коэффициент, $R_{ср}$ – средний радиус поверхностей трения фрикционных дисков 3 и 4), тогда формулу (1) можно записать в виде:

$$F_0 = n \sum F_n \quad (2)$$

где C – коэффициент усиления УУ:

$$C = \frac{R}{r} \operatorname{tg} \alpha.$$

Из выражения (2) следует, что при данной схеме компоновки АФМ сила замыкания пар трения в nC больше, чем сила замыкания в АФМ 1-го поколения, при одинаковых значениях сил натяжения тангенциальных упругих силовых элементов.

Сила, с которой прижаты друг к другу пары трения в АФМ 1-го поколения при передаче вращающего момента T_i , равна:

$$F_{pi}' = F_{\Pi}' - F_{pi}, \tag{3}$$

где F_{Π}' – сила натяжения упругого силового элемента;

$F_{p.i}$ – распорная (отжимная) сила УУ.

Величина силы $F_{p.i}$ вычисляется по формуле:

$$F_{pi} = \frac{T_i}{r} \operatorname{tg} \alpha.$$

Подставив правую часть последнего равенства в формулу (3), получим:

$$F_{pi}' = F_{\Pi}' - \frac{T_i}{r} \operatorname{tg} \alpha. \tag{4}$$

Аналогично для модифицированной АФМ можно записать:

$$F_{pi}' = F_{\Pi}' - \frac{T_i'}{r} \operatorname{tg} \alpha. \tag{5}$$

В формуле (5) параметр T_i' – вращающий момент АФМ, T_{Π} – момент сил от действия тангенциально установленных упругих силовых элементов.

Величины вращающих моментов АФМ определяются по формулам:

$$T_i = z F_{\Pi} R_{cp} f_i, \tag{6}$$

$$T_i' = z F_{\Pi}' R_{cp} f_i, \tag{7}$$

где z – число пар трения фрикционной группы;

f_i – текущее значение коэффициента трения.

Подставим правые части формул (4) и (5) соответственно в выражения (6) и (7), полагая при этом, что $\sum F_{\Pi} = F_{\Pi}'$. В результате решения соответствующих уравнений получим:

$$T_i = z R_{cp} F_{\Pi} f_i, \tag{8}$$

$$T_i' = z R_{cp} F_{\Pi}' f_i. \tag{9}$$

Анализ формул (8) и (9) показывает, что при одинаковых значениях параметров z , F_{Π} , R_{cp} , f_i и C справедливо неравенство $T_i' > T_i$. Следовательно, модифицированный вариант АФМ обладает большей, чем АФМ 1-го поколения, нагрузочной способностью.

Что касается точности срабатывания сравниваемых муфт, то при указанном условии она одинакова, так как выражается формулой для вычисления коэффициента точности

$$K_T = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}. \tag{10}$$

В формуле (10) параметры f_{\min} и f_{\max} – со-

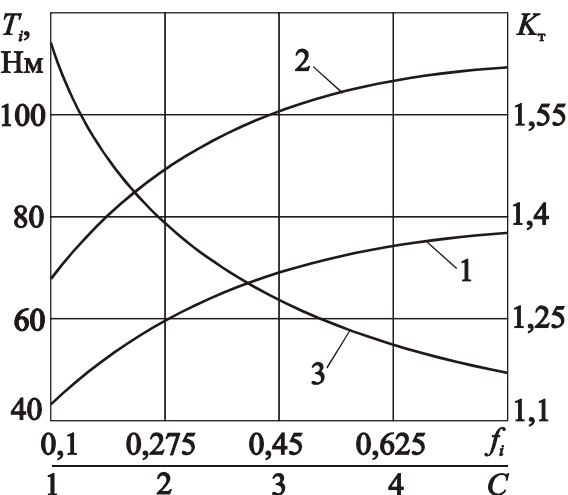


Рисунок 2 – Графики зависимостей K_T и f_i

ответственно минимальное и максимальное значения, которые может принимать коэффициент трения в реальных условиях эксплуатации муфты.

Однако, как отмечено выше, а также согласно соотношению (8), увеличение КУ уменьшает величину момента T_i , тогда как вращающий момент T'_i увеличивается по мере роста величины КУ. Следовательно, и точность срабатывания и нагрузочная способность модифицированной АФМ увеличиваются с увеличением КУ. Это создает реальные предпосылки для достижения оптимального сочетания нагрузочной способности и точности срабатывания муфты.

Данный вывод иллюстрируется графиками, показанными на рисунке 2. Кривая 1 на рисунке отражает функцию (8), кривая 2 – функцию (9), кривая 3 – функцию (10). Графики построены при $z=10$, $F_{\Pi}=1000$ Н, $R_{ср}=0,1$ м, $n=1,2$, $f_{\min}=0,1$, $f_{\max}=0,8$. Кривые 1 и 2 построены при значении f_{\min} .

Графики показывают, что нагрузочная способность модифицированной АФМ значительно (в nC раз) выше, чем нагрузочная способность АФМ 1-го поколения (кривая 1) при одинаковой точности срабатывания.

Величина КУ не имеет ограничения сверху, обусловленного необходимостью выполнения условия $\alpha < \frac{\pi}{2} - \rho$ (где ρ – угол трения между поверхностями фрикционной пары) [7]. Действительно, самоторможение пар трения при срабатывании АФМ будет отсутствовать, поскольку действие внешнего момента сил приводит к появлению тангенциальной силы F_t ,

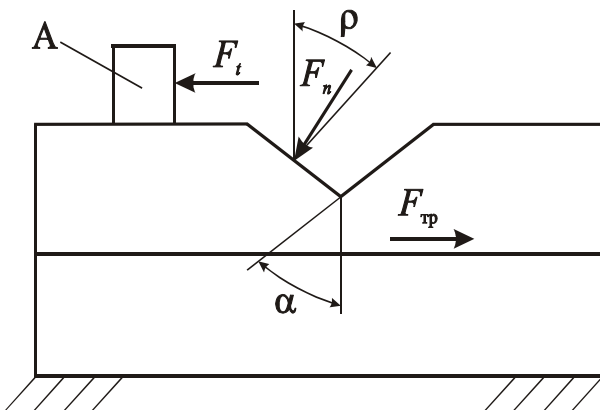


Рисунок 3 – Схема сил, действующих на фрикционный контакт модифицированной АФМ

приложенной к опорной поверхности А (рисунок 3). При отсутствии срабатывания АФМ сила F_t уравновешена силой трения $F_{тр}$, являющейся результатом действия нормальной силы F_o . Срабатывание муфты, сопровождаемое скольжением пар трения, произойдет при $F_t > F_{тр}$, независимо от расположения вектора нормальной силы F_n относительно угла трения ρ , т. е. независимо от соотношения значений углов α и ρ .

Необходимым условием работоспособности модифицированной АФМ является выполнение неравенства $T_{\Pi} > T_{\max}$ (где T_{\max} – вращающий момент АФМ при значении коэффициента трения $f_i = f_{\max}$).

Используя принятое выше соотношение между силами $\sum F_{\Pi}$ и F'_{Π} , формулу (9), а также формулу $T_{\Pi} = nR_{ср} \sum F_{\Pi}$, получим

$$n > \frac{z C_{f_{\max}}}{1 + z C_{f_{\max}}} \quad (11)$$

Из неравенства (11) найдем ограничение величины КУ, удовлетворяющее условию работоспособности АФМ:

$$C < \frac{n}{1 + n f_{\max}} \quad (12)$$

Правая часть неравенства (11) меньше единицы, однако приближается к ней при увеличении КУ, если $z C_{f_{\max}} > 1$. Поэтому теоретически ограничение величины КУ сверху будет отсутствовать при значениях коэффициента n , близких к единице, но меньших ее. Кроме того, из неравенства (11) следует, что оно удовлетворяется, в том числе, при значениях коэффициента n , больших единицы.

Коэффициент n отражает запас АФМ по вращающему моменту, т. е. соотношение значений моментов $T_{п}$ и T_{max} , следовательно, он определяет надежность работы АФМ с точки зрения передачи вращающего момента заданной величины. Чем выше значение коэффициента n , тем выше надежность АФМ. Конструктивно-компоновочное решение муфты позволяет реализовать условие $n > 1$ ($R > R_{ср}$), которое предпочтительно также с точки зрения увеличения нагрузочной способности АФМ (см. формулу (9)). Кроме того, увеличение коэффициента n позволяет упростить компоновку тангенциально устанавливаемых упругих силовых элементов за счет увеличения радиуса R расположения их на нажимном диске, и практически исключить влияние числа пар трения z на ограничение сверху величины КУ (см. формулу (12)).

Результаты исследования могут найти практическое применение на предпроектной стадии при обосновании выбора принципиальной и конструктивной схемы АФМ, оптимальной для конкретных условий эксплуатации рабочей машины.

ВЫВОДЫ

1. Основная причина невысокой надежности работы АФМ 1-го поколения (на базе муфты Н.Д. Вернера) – разделение функций нажимного устройства и управляющего устройства, осуществляемых различными механизмами. В результате этого повышение надежности работы АФМ требует увеличения КУ, что снижает нагрузочную способность и реально ограничивает надежность муфты.

2. Принципиальное изменение конструктивно-компоновочной схемы АФМ, заключающееся в расположении УУ со стороны нажимного узла и силовом замыкании элементов фрикционной группы посредством тангенциально расположенных упругих силовых элементов, позволяет совместить в УУ функции нажимного узла и устройства обратной связи. В результате этого увеличение КУ, приводящее к повышению надежности работы АФМ, повышает ее нагрузочную способность.

3. Возможность модифицированной АФМ поддерживать собственную работоспособность зависит от величины КУ. Ограничение величины КУ и числа пар трения отсутствует в тех случаях, когда тангенциальные упругие силовые элементы расположены относительно оси вращения муфты на расстоянии, равном среднему радиусу поверхностей трения фрикционной группы или большим его.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко, С.К. Предохранительные муфты / С.К. Дьяченко, Н.Ф. Киркач. – Киев: Гостехиздат УССР, 1962. – 122 с.
2. Решетов, Д.Н. Надежность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев; Под ред. Д.Н. Решетова. М.: Высш. шк., 1988. – 238 с.
3. Поляков, В.С. Муфты. Конструкции и расчет / В.С. Поляков, И.Д. Барбаш. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1973. – 336 с.
4. Запороженко, Р.М. О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания / Р.М. Запороженко // Изв. вузов. Машиностроение. – 1971. – № 1. – С. 48–52.
5. Шишкарев, М.П. Распределение нагрузки в муфте Н.Д. Вернера и выбор ее параметров / М.П. Шишкарев // Вестн. машиностроения. – 2001. – № 6. – С. 811.
6. Шишкарев, М.П. Теоретические основы стабилизации выходного параметра адаптивного фрикционного контакта твердых тел / М.П. Шишкарев // Изв. вузов. Машиностроение. – 2001. – № 23. – С. 1723.
7. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики. В 2 т. Т. 1: Статика и кинематика / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – 4-е изд., исправл. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1985. – 240 с.

Шишкарев Михаил Павлович

Ростовская-на-Дону государственная академия сельскохозяйственного машиностроения, г. Ростов-на-Дону
Доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Технология автоматизированного машиностроения»
Тел. (863-2) 52-41-35
E-mail: Shishkarev@tam.rgashm.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ **И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

УДК 621.822.6-97: 621.317.757.08

Н.В. ДАВЫДОВА, С.Ф. КОРНДОРФ, Т.И. НОГАЧЁВА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНОЙ ЯЧЕЙКИ МЕТОДОМ ВОЛЬТМЕТРА-АМПЕРМЕТРА

В статье показана возможность применения модифицированного метода вольтметра-амперметра для исследования параметров емкостной ячейки. Также описан выбор оптимального образцового сопротивления измерительной схемы, при котором ошибка измерения минимальна.

Ключевые слова: метод вольтметра-амперметра, емкостная ячейка, диэлектрик, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь.

The modified method of voltmeter-ammeter, intended for research of parameters of capacity measuring cell, is described in the article. A choice over of exemplary resistance which a measuring error is minimum at is also brought.

Key words: method of voltmeter of ampermeter, capacity cell, liquid dielectric, dielectric constant, the dielectric power factor.

Для исследования свойств диэлектрических материалов наиболее целесообразно использовать электрические методы, позволяющие осуществлять дистанционные измерения с высокой точностью и быстродействием, их автоматизацию и лёгкость обработки результатов измерения. При этом приходится решать две задачи: выявление связи измеряемых электрических величин с контролируемыми параметрами и разработку наиболее простых и достаточно точных методов измерения. Настоящая работа посвящена решению второй задачи – разработке метода измерения сопротивления диэлектрических потерь в широком частотном диапазоне. Обычно для этих целей исследуемый материал помещают в емкостную ячейку, параметры которой измеряют. Затем на основании полученных результатов измерения и параметров ячейки рассчитывают сопротивление потерь и диэлектрическую проницаемость материала. В настоящее время для измерения электрических параметров емкостных ячеек применяются различные методы: мостовые, резонансные, вольтметра-амперметра, волноводные. Применение того или иного метода в первую очередь зависит от диапазона частот, в котором проводятся измерения.

Мостовые методы применяются преимущественно на низких частотах, так как на высоких частотах велико влияние паразитных емкостей [1]. Резонансные методы используются на высоких частотах, причём точность измерения повышается с уменьшением угла диэлектрических потерь [1]. Наиболее простым методом измерения является метод вольтметра-амперметра, позволяющий получить достаточно высокую точность в широком диапазоне частот и при значительных диэлектрических потерях [2].

Однако этот метод приходится модифицировать, так как на высоких частотах для измерения тока в измерительной цепи применяют вместо амперметра образцовое сопротивление, напряжение на котором измеряется вольтметром. В этом случае для определения параметров емкостной ячейки её необходимо включить в цепь источника питания и измерять падение напряжения на ячейке, на образцовом резисторе, включенном последовательно с ней, и общее напряжение в цепи.

Реализация этого метода с помощью одной измерительной схемы с тремя вольтметрами оказывается невозможной, так как входы вольтметров имеют зажимы, предназначенные для подключения к общей точке схемы (корпусу прибора, экрану или заземлению). Поэтому приходится использовать два вольтметра вместо трёх, и измерения проводить дважды, в соответствии со схемами а и б, представленными на рисунке 1.

На рисунке 1 емкостная ячейка представлена в виде эквивалентной схемы последовательно включенных сопротивления потерь r и ёмкости C .

В качестве источника питания используется генератор синусоидальных колебаний PG . Частота напряжения генератора измеряется частотомером PF .

Напряжение на образцовом резисторе определяется по показаниям вольтметра $PV1$ при использовании схемы, приведённой на рисунке 1а. Напряжения на измерительной ячейке также определяется по показаниям вольтметра $PV1$, включенного в соответствии со схемой, изображённой на рисунке 1б.

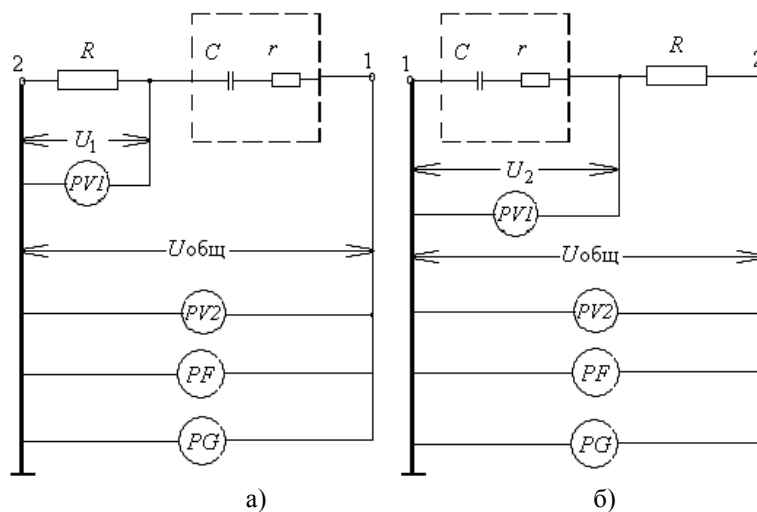


Рисунок 1 – Схемы измерения параметров емкостной ячейки, методом двух вольтметров: (а) схема измерения напряжения на образцовом резисторе; (б) схема измерения напряжения на исследуемой ячейке

Вольтметр $PV2$ измеряет общее напряжение в измерительной цепи, которое должно быть одним и тем же по значению и частоте при измерениях на резисторе и измерительной ячейке.

Таким образом, ток, протекающий в измерительной цепи можно описать следующей системой уравнений:

$$I = \frac{U_1}{R}, \tag{1}$$

$$I = \frac{U_2}{\sqrt{r^2 + x^2}}, \tag{2}$$

$$I = \frac{U_{\text{общ}}}{(R+r)^2 + x^2}, \tag{3}$$

где $\sqrt{(R+r)^2 + x^2}$ – модуль общего сопротивления измерительной ячейки;

x – реактивная составляющая сопротивления ячейки;

r – активная составляющая сопротивления ячейки с диэлектрическим материалом, являющаяся сопротивлением потерь.

Решение этой системы позволяет получить выражения для расчёта параметров ячейки:

$$r = \frac{1}{2} \cdot R \cdot \left(\frac{U_{\text{общ}}^2}{U_1^2} - \frac{U_2^2}{U_1^2} - 1 \right). \tag{4}$$

$$x = R \cdot \sqrt{\left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{U_{\text{общ}}^2}{U_1^2} - \frac{U_2^2}{U_1^2} - 1 \right)^2}. \tag{5}$$

Для уменьшения погрешности измерения параметров емкостной ячейки, в частности сопротивления потерь r , необходимо обеспечить максимальную чувствительность метода измерения по данному параметру.

Так как напряжение на образцовом резисторе:

$$U_1 = U_{\text{общ}} \cdot R \cdot [(r+R)^2 + x^2]^{-\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

то относительная чувствительность схемы по параметру r определяется формулой:

$$S_{\text{отн}} = \left[\frac{\partial U_1}{U_1} \cdot \frac{r}{dr} \right] = \frac{r \cdot (r+R)}{(r+R)^2 + x^2}. \quad (7)$$

Как видно из выражения (7), чувствительность зависит не только от параметров измерительной ячейки, но и от значения образцового сопротивления R .

Взяв производную по R от выражения (7):

$$\frac{dS_{\text{отн}}}{dR} = \frac{x^2 - (r+R)^2}{[(r+R)^2 + x^2]^2} \quad (8)$$

и приравняв её нулю, получим уравнение, определяющее оптимальное значение R , при котором чувствительность достигает максимального значения:

$$R^2 + 2 \cdot r \cdot R + r^2 - x^2 = 0. \quad (9)$$

Корнями уравнения (9) являются:

$$R_{1,2} = -r \pm x. \quad (10)$$

Так как значение сопротивления не может быть отрицательным, то единственным корнем, удовлетворяющим поставленному условию, при $x > r$ является:

$$R_{\text{опт}} = x - r. \quad (11)$$

При этом значении $R_{\text{опт}}$ максимальная чувствительность:

$$S_{\text{отн макс}} = \frac{r}{2 \cdot x}. \quad (12)$$

При отклонении значения сопротивления от оптимального чувствительность уменьшается. Степень уменьшения чувствительности ξ характеризуется отношением $S_{\text{отн}} / S_{\text{отн макс}}$:

$$\xi = \frac{S_{\text{отн}}}{S_{\text{отн макс}}} = \frac{2 \cdot \frac{x}{r} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{x}{r} - 1 \right) \right)}{\left[1 + \alpha \cdot \left(\frac{x}{r} - 1 \right) \right]^2 + \left(\frac{x}{r} \right)^2}, \quad (13)$$

где $\alpha = R / R_{\text{опт}}$.

Зависимости коэффициента ξ от α при различных значениях отношения x/r приведены на рисунке 2.

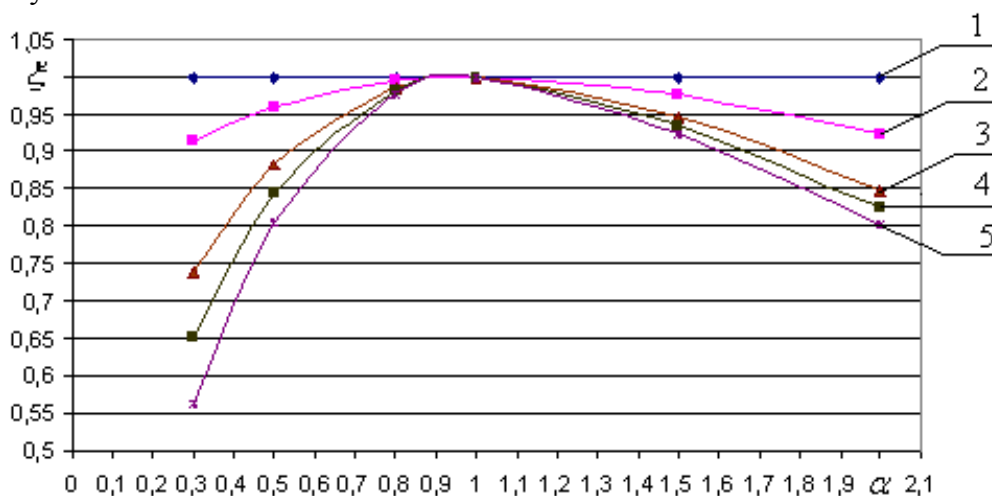


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента ξ от α при $x/r=1$ (1); $x/r=2$ (2); $x/r=5$ (3); $x/r=10$ (4); $x/r=100$ (5)

Полученные зависимости показывают, что увеличение значения образцового сопротивления R относительно оптимального значения $R_{\text{опт}}$ в 1,5 раза приводит к уменьшению чувствительности не более чем на 6-8 %. Следовательно, точный подбор образцового сопротивления не обязателен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник [Текст] / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев [и др.]. - М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
2. Корндорф, С.Ф. Радиоизмерения [Текст] / С.Ф. Корндорф и др, М.: Госэнергоздат, 1953 г., -464 с.

Давыдова Надежда Владимировна

Орловский государственный технический университет, г.Орёл
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (0862)419876
E-mail: pms@ostu.ru

Корндорф Сергей Фердинандович

Орловский государственный технический университет, г.Орёл
Доктор технических наук, профессор кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (0862)419876
E-mail: pms@ostu.ru

Ногачёва Татьяна Ивановна

Орловский государственный технический университет, г.Орёл
Кандидат технических наук, доцент
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (0862)419876
E-mail: pms@ostu.ru

В.К. ГАРИПОВ, А.Е. ЯЦУК

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ГЕРМЕТИЧНО ИЗОЛИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена проблема обеспечения условий жизнедеятельности человека или коллектива людей (персонала) в условиях нахождения в герметично замкнутых объектах. Показано, что в этих случаях необходимо применение автоматизированных систем регенерации воздушной среды. Проведен анализ существующих систем и предложено конкретное техническое решение, позволяющее эффективно решить поставленные задачи.

Ключевые слова: автоматизированная система, регенерация, воздушная среда, герметично замкнутый объект, поглотитель двуокиси углерода, динамическая активность.

The problem of maintenance of conditions of ability to live of the person or collective people (personnel) in the conditions of a finding in tightly closed objects is considered. It is shown that in these cases application of the automated systems of regeneration of the air environment is necessary. The analysis of existing systems is carried out and the concrete technical decision allowing effectively to solve task in view is offered.

Key words: the automated system, regeneration, the air environment, tightly closed object, an absorber of dioxide of carbon, dynamic activity.

Объекты производственного, научного или специального назначения делятся условно по степени взаимодействия с окружающей средой на открытые, частично изолированные и герметично изолированные (рисунок 1) [1].

Открытые или частично изолированные объекты сложны в плане определения возмущающих воздействий, природа которых зависит от влияния внешней среды. При этом взаимодействие технических средств и персонала проявляется не столь явно и не определяет условия жизнедеятельности. Характерной чертой герметично замкнутых объектов является отсутствие взаимодействия с внешней средой, что обуславливает высокую степень взаимного влияния элементов объекта и персонала. Отсюда следует, что с точки зрения задачи обеспечения условий жизнедеятельности человека или коллектива людей (персонала) наиболее сложной является задача, относящаяся к объектам последнего типа.

В этих случаях необходимо применение специальных технических средств, осуществляющих восстановление необходимого газового состава воздушной среды, т.е. процесса ее регенерации [1, 2]. Такими средствами являются автоматизированные системы регенерации воздушной среды (АСР ВС).

Процесс регенерации воздушной среды в герметично замкнутом объеме заключается в трех основных функциях: удаление диоксида углерода; восстановление кислорода; удаление вредных примесей.

Удаление диоксида углерода из воздуха может проводиться на основе [3]: расходующих химических поглотителей; регенерируемых поглотителей (жидких абсорбентов, твердых аминов, молекулярных сит); электрохимических методов; криогенного вымораживания.

Обеспечение кислородом может осуществляться [3, 4]: с помощью сжатого кислорода или воздуха из баллонов; с помощью химически связанного кислорода; электрохимическим разложением воды; из твердых источников кислорода.

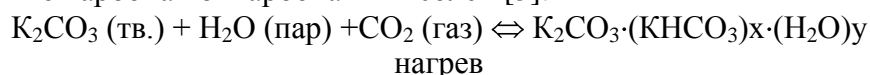
Удаление вредных примесей может осуществляться с применением сорбентов, мембран и т.д. в зависимости от конкретного вещества [4].

Проведенный анализ результатов разработки и применения различных методов очистки воздушной среды от двуокиси углерода в РФ, США, ФРГ и Японии показал, что на протяжении последних 40 лет параллельно разрабатывались два типа АСР ВС от двуокиси углерода с применением регенерируемых поглотителей [5].



Рисунок 1 – Виды взаимодействия объекта и внешней среды

В российских АСР ВС применяется твёрдый поглотитель на основе карбоната калия с добавками. Химические реакции поглощения и выделения двуокиси углерода сводятся к обратимому образованию карбонат-бикарбонатных солей [5]:



Для поглощения двуокиси углерода необходимо поглощение эквивалентного количества водяных паров для их взаимного связывания в бикарбонат-ион.

Существующие в настоящее время АСР ВС типа УРМ-180, УРМ-М, «КЕДР», «КАЛИНА», использующие в своем составе функциональные блоки с однотипным твёрдым регенерируемым поглотителем на основе карбоната калия, решили задачу длительной очистки воздуха от двуокиси углерода, однако, они имеют ряд недостатков [5]:

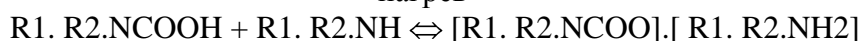
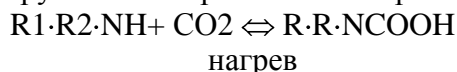
- большие удельные объёмы АСР ВС;
- снижение производительности АСР ВС при длительной работе из-за разбухания или наоборот усадки поглотителя на 20-40%;
- резкое снижение производительности АСР ВС при относительной влажности воздуха ниже 40%;
- высокая температура регенерации поглотителя, 210 °С;
- высокая энергоёмкость.

Основным недостатком существующих АСР ВС с применением в их составе функциональных блоков с поглотителями из карбоната калия является низкая концентрация десорбируемой двуокиси углерода, заложенная в технологической схеме поглотителей.

АСР ВС типа УРМ, а также «КЕДР», «КАЛИНА» в режиме «выделение» работают как реакторы идеального смешения, т.к. передача тепла от нагревателя к поглотителю производится газовым потоком, циркулирующим по замкнутому контуру с помощью вентилятора в герметичном исполнении.

С другой стороны, АСР ВС воздушной среды от двуокиси углерода в атомных подводных лодках США базировались на использовании жидких регенерируемых поглотителей, в частности, водного раствора моноэтаноламина [2].

В этом случае, основная реакция состоит в прямом взаимодействии двуокиси углерода с первичной и вторичной аминогруппами с образованием карбамата по реакции:



Положительными качествами АСР ВС с использованием функциональных блоков с жидким регенерируемым поглотителем являются: компактность АСР ВС, содержащей двуокись углерода более 0,3%; низкая температура регенерации поглотителя, 105-125 °С; высокая концентрация двуокиси углерода в десорбируемых газах.

Недостатками АСР ВС с жидким поглотителем на основе аминов являются: необходимость очистки воздуха от продуктов деградации поглотителя; существенное возрастание габаритов АСР ВС, в частности, узла очистки воздуха от вредных примесей, при объёмной доле двуокиси углерода в воздухе ниже 0,3%.

Альтернативой двум указанным типам АСР ВС является АСР ВС с хроматографическим концентрированием двуокиси углерода на твёрдом поглотителе, регенерируемом водяным паром [2].

Выделение двуокиси углерода происходит в режиме реактора идеального вытеснения. Двуокись углерода и воздух вытесняются из слоя поглотителя за один проход водяного пара без рециркуляции газов. Причём, за счёт лучшей адсорбируемости, двуокись углерода выходит из слоя поглотителя после воздуха. Объёмная доля выделяемой из слоя поглотителя двуокиси углерода достигает 99 % и выше.

Установки с твёрдым поглотителем, регенерируемым водяным паром, выгодно отличаются от установок с твёрдым регенерируемым поглотителем на основе карбоната калия или жидким поглотителем своей компактностью при объёмной доле двуокиси углерода 0,1-0,3 %, отсутствием загрязнения воздуха продуктами деструкции поглотителя, низкой температурой регенерации поглотителя.

Используемые в разработках США, ФРГ, Японии в качестве поглотителей двуокиси углерода, регенерируемых водяным паром, твёрдые амины обладают высокой динамической активностью, поглощая из воздуха за 36 мин 12-15 л двуокиси углерода на 1 кг сухого поглотителя, или 6-8 л/л, при объёмной доле двуокиси углерода 0,3 % [2].

Недостатками твёрдых аминов для случая их использования в качестве поглотителя двуокиси углерода, регенерируемого водяным паром, являются: необходимость сохранения влажности твёрдого амина в жёстких пределах от 18% до 30% от массы сухого поглотителя; существенные, на 1/3, изменения объема шихты, зависящие от степени увлажнения твёрдого амина; окисление поглотителя кислородом воздуха, приводящее к деградации поглотителя и загрязнению воздуха вредными примесями, в частности, триметиламином.

Разработанный ТамбовНИХИ неорганический поглотитель двуокиси углерода ПРЦ-М на основе стабилизированной гидроокиси циркония по динамической активности, отнесённой к единице объёма шихты, не уступает твёрдым аминам и обладает такими ценными эксплуатационными свойствами, как [4]: высокой термостойкостью; достаточностью контроля только верхнего предела увлажнения поглотителя; отсутствием заметных объёмных изменений при различной влажности поглотителя; отсутствием загрязнения воздуха, нетоксичностью и отсутствием раздражающих свойств; стойкостью к кислороду воздуха; меньшей удельной теплоёмкостью поглотителя.

АСР ВС, в общем случае, может быть представлена в виде следующей блок-схемы:

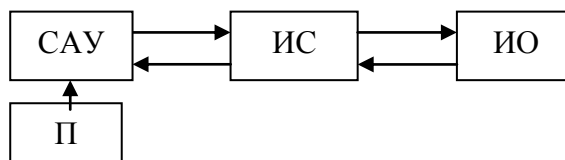


Рисунок 2 – Блок-схема АСР ВС:

САУ – система автоматического управления;

ИС – исполнительная система; ИО – изолированный объект; П – пульт

С помощью САУ обеспечивает управление ИС как в автоматическом режиме, с использованием электронного блока, так и в ручном режиме с помощью пульта П.

При разработке АСР ВС с целью существенного уменьшения объема и веса АСР ВС от двуокиси углерода, снижения их шума и вибраций, возможности получения концентрированной двуокиси углерода, пригодной для дальнейшей утилизации совместно с водородом, снижения энергозатрат и снижения температуры регенерации поглотителя был выбран метод очистки воздуха твёрдым неорганическим поглотителем, регенерируемым водяным паром.

Одинаковое направление от центра к периферии потока водяного пара в режиме «выделение» и потока воздуха в режимах «поглощение» и «охлаждение» позволило упростить конструкцию АСР ВС за счёт объединения в одном замкнутом контуре адсорбера, холодильника и парогенератора.

В состав ИС входит следующее оборудование: адсорбер; парогенератор; клапан с пневмоприводом двухходовой; пневмоклапан двухходовой; холодильник-конденсатор; электровентиль;

Адсорбер состоит из следующих узлов: кассет с поглотителем ПРЦ-М; корпуса.

Кассеты предназначены для размещения в них гранулированного поглотителя ПРЦ-М, для организации движения потоков воздуха и водяного пара по схеме «развёрнутая шихта» в направлении от центра к периферии. Кассета состоит из наружной и внутренней обечайки, соединенных верхней и нижней крышками.

Твёрдый регенерируемый поглотитель ПРЦ-М представляет собой гранулы основной фракции 1,5-2,5 мм.

Корпус служит для организации потоков и размещения узлов.

Парогенератор служит для получения водяного пара в режиме «выделение» и сбора конденсата в режимах «охлаждение» и «поглощение».

Экспериментальные испытания поглотителя ПРЦ-М проводились на полноразмерном макете производительностью 0,6 м³/ч.

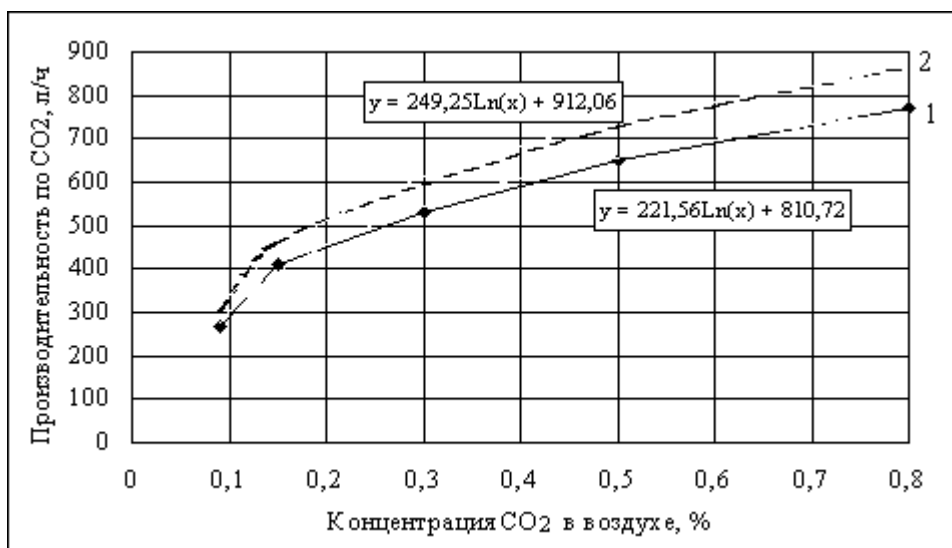


Рисунок 3 – Влияние концентрации двуокиси углерода на производительность макета АСР ВС:
 1 – экспериментальные данные для макета (80 дм³ поглотителя);
 2 – расчет для АСР ВС (90 дм³ поглотителя)

Таблица 1 – Сравнение эксперимента и расчетов по CO₂

Объёмная доля CO ₂ , %	Производительность акета по CO ₂ (эксперимент), л /ч	Производительность АСР ВС по CO ₂ (расчёт), л/ч
0,09	270	300
0,15	410	460
0,30	530	600
0,50	650	730
0,80	770	860

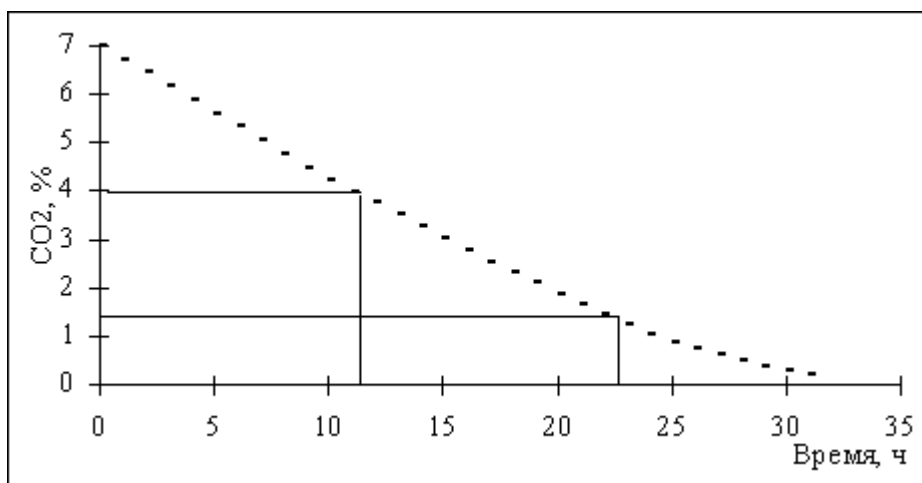


Рисунок 4 – Падение концентрации двуокиси углерода в помещении объемом 500м³ при работе АСР ВС

АСР ВС работает циклично. Каждый временной цикл состоит из следующих друг за другом режимов «поглощение», «выделение», «охлаждение». В режиме «поглощение» производится очистка воздуха от двуокиси углерода, продувкой воздуха через слой поглотителя. В режиме «выделение» поглощённая двуокись углерода выделяется в газовую фазу и концентрируется. При этом поглотитель регенерируется, восстанавливая свою способность к поглощению двуокиси углерода.

Экспериментальные данные по выделению газа из макета АСР ВС и изменение концентрации двуокиси углерода в выделяемом газе при его работе в режиме “выделение” (десорбция) показаны на рисунках 5–7.

Сопоставляя рисунки 5–7 можно сделать вывод, что выделение газа проходит в две стадии. На первой стадии (до 6–8 мин.) выделяется чистый воздух, затем содержание двуокиси углерода в выделяемом газе резко возрастает до 100 %.

На кривой скорости выделения газа (рис.6) наблюдается два максимума, которые соответствуют выделению воздуха и двуокиси углерода. Максимальная скорость выделения воздуха около 30 л/мин., двуокиси углерода - 130 л/мин.

Производительность макета уменьшается с увеличением концентрации двуокиси углерода в газе, отбираемом для утилизации. Эта зависимость рассчитанная на основании экспериментальных данных представлена на рисунке 7.

В таблице 2 приведены данные о потерях воздуха в зависимости от концентрации двуокиси углерода в утилизируемом газе.

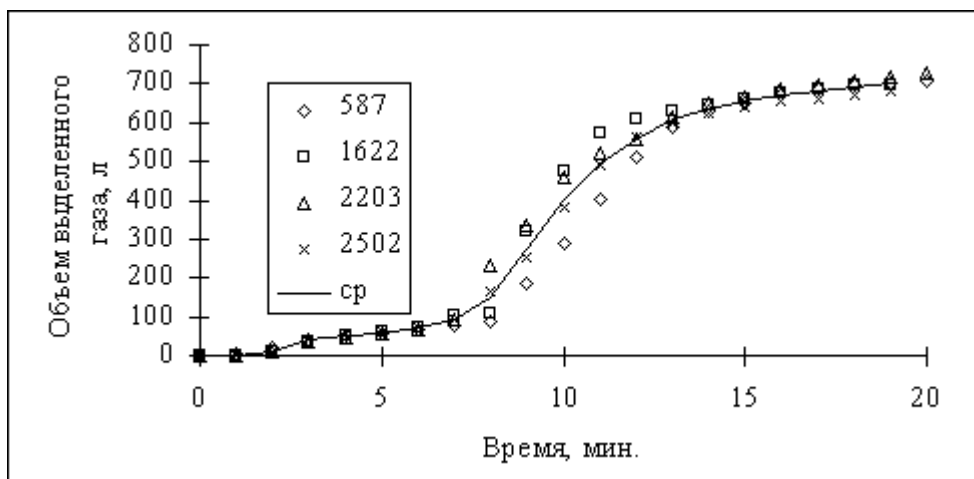


Рисунок 5 – Динамика выделения газа из макета АСР ВС в режиме десорбции

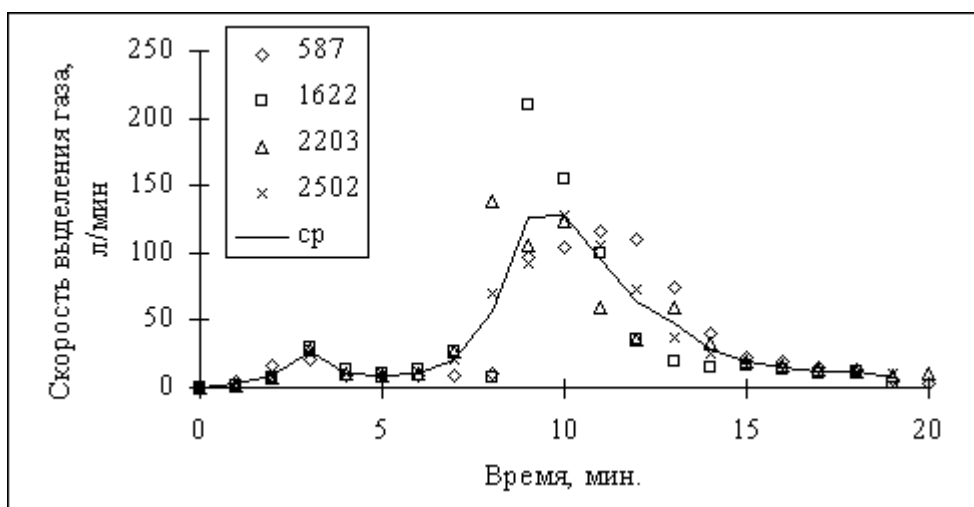


Рисунок 6 – Кинетика выделения газа из макета АСР ВС в режиме десорбции

Таблица 2 – Данные о потерях воздуха

Потери воздуха, л/ч	126	90	80	60	40	23	16	6	1
Концентрация двуокиси углерода в отобранном для утилизации газе, % об.	82	86	88	91	93	96	97	98.8	99.8

При содержании двуокиси углерода в газе 97% потери воздуха не превысят 16 л/ч при производительности макета по двуокиси углерода 530 л/ч.

Относительная влажность воздуха в пределах 30-100% не оказывает существенного влияния на производительность полноразмерного макета АСР ВС, благодаря предварительному подогреву очищаемого воздуха на (12-15) °С. Производительность макета АСР ВС при различной влажности воздуха после 90-110 суток испытаний представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Производительность макета АСР ВС при различной влажности воздуха

Относительная влажность воздуха, %	30-50	50-80	85-100
Производительность макета АСР ВС при $C_{CO_2} = 0,3\%$, л/ч	550	530	530

Таким образом, преимуществом представленной АСР ВС являются независимость ошения двуокси углерода от выделения кислорода в электролизёре, отсутствие виброшумо-активных насосов для перекачки щелочных растворов, применение вместо раствора едкой щёлочи инертного твёрдого поглотителя, совмещение адсорбера с десорбером, отсутствие негативного влияния качки на производительность по двуокиси углерода.

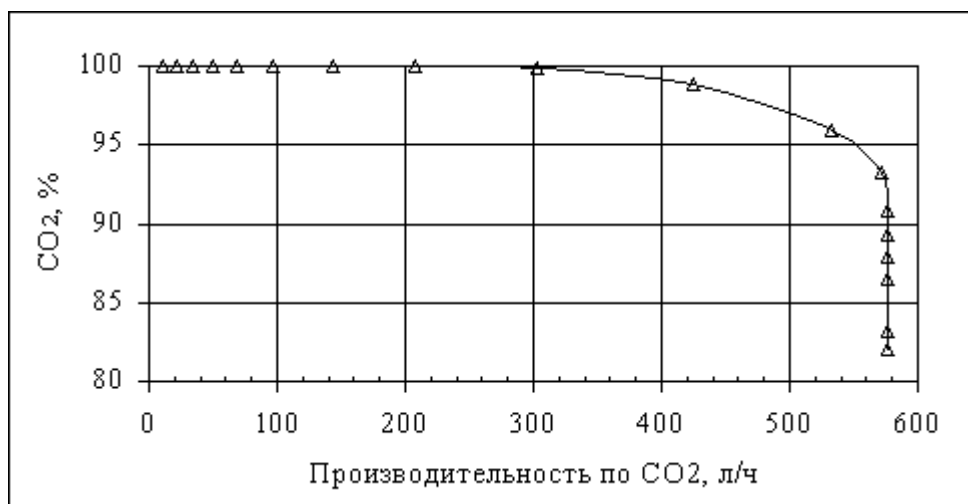


Рисунок 8 – Зависимость производительности по двуокиси углерода макета АСР ВС от усредненной концентрации двуокиси углерода в отобранном для утилизации газе

Такие характеристики АСР ВС позволяют создавать системы отдельной регенерации воздуха, имеющие существенные эксплуатационные преимущества по сравнению с системами электрохимической регенерации воздуха совмещённого типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путин, С.Б. Математическое моделирование и управление процессом регенерации воздуха / С.Б. Путин. – М.: Машиностроение, 2008. – 176 с.
2. Ильин, А.Н. Обзор вопросов по процессам регенерации воздуха / А.Н. Ильин, С.Б. Путин. – М., 2003. – 10 с. – Деп. в ВИНТИ, 2003, № 2103-В2003.
3. Ильин, А.Н. Оптимальное управление процессом регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме / А.Н. Ильин, С.В. Матвеев, И.В. Милованов, С.Б. Путин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 1. – С. 6-12.
4. Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратное оформление / Н.Ф. Гладышев, Т.В. Гладышева, С.И. Дворецкий, С.Б. Путин и др. – М.: Издательство Машиностроение-1, 2007. – 85 с.
5. Яцук, А.Е. Анализ методов очистки воздуха от двуокси углерода с применением жидких поглотителей / А.Е. Яцук, В.К. Гарипов // Вестник МГУПИ. Выпуск 22. М.: 2009. – С. 72-82.

Гарипов Вадим Кадимович

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
 Доктор технических наук, профессор, директор Инновационного Центра «Технопарк МГУПИ»
 Тел. (495) 964-91-10, (+7) 916-683-72-77
 E-mail: garvad@mail.ru

Яцук Александр Егорович

ОАО Специальное конструкторско-технологическое бюро по электрохимии с опытным заводом (СКТБЭ), г. Москва,
 генеральный директор
 Тел. (495) 964-91-10

С.Р. ГАБДУЛГАЗИЕВ

МЕТОД БЫСТРОЙ ОЦЕНКИ ИСТОЧНИКОВ ГАУССА-МАРКОВА НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО КВАНТОВАНИЯ

В статье предложено решение задачи кодирования источника Гаусса-Маркова, т.е. представления реализации случайного процесса в виде конечного вектора и быстрой оценки вероятности появления данного вектора с учетом знания функции плотности распределения вероятности с определенной заранее ошибкой. Высокое быстродействие достигается использованием векторного квантования и оригинальным способом быстрого поиска. Относительно малая вычислительная сложность способа достигается за счет предварительного создания структуры данных для поиска. Данный метод может быть использован в задачах распознавания образов, сжатии речи, изображений и других видах данных допускающих кодирование с потерями.

Ключевые слова: векторное квантование, быстрый поиск, случайный процесс, классификация.

In article the decision of a problem of coding of Gauss-Markovs source, i.e. representations of realization of stochastic process in the form of a final vector and a fast estimation of probability of occurrence of the given vector in view of knowledge of function of density of distribution of probability with the error certain in advance is offered. High speed is achieved by use of vector quantization and original way of fast search. Rather small computing complexity of a way is achieved due to preliminary creation of structure of data for search. The given method can be used in problems of pattern recognition, compression of speech, images and other kinds of data supposing coding with losses.

Keywords: Vector quantization, fast search, casual process, classification.

Цель данной статьи дать описание предложенного метода быстрой оценки вероятности появления реализации (далее оценки) источника Гаусса-Маркова (ГМ) на основе векторного квантования.

Источник Гаусса-Маркова задается случайным авторегрессионным процессом (АР), элементы которого определяются следующим выражением

$$x_i = -\sum_{j=1}^p a_j x_{i-j} + z_i, \quad i = p+1, p+2, \dots,$$

где $a_j, j = 1, \dots, p$ – фиксированные коэффициенты;

$z_i, i = p+1, p+2, \dots$ – независимые случайные величины, распределенные по гауссовому закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_z . [1]

Для выполнения оценки источника ГМ необходимо, во-первых, определить необходимое количество точек представления. Теоретический ответ для данной задачи предложен во многих работах [2, 3]. После, выполняется построение квантователя источника ГМ с размерностью определенной на предыдущем этапе и с требуемой ошибкой квантования. В работе [1] рассмотрены вопросы построения квантователя источника ГМ для разных размерностей со сколь угодно малой ошибкой квантования. В процессе работы квантователя каждому входному вектору ставится в соответствие вектор из кодовой книги, для которого определено значение вероятности появления вектора для рассматриваемого источника ГМ. Далее по оценке вероятности, полученной с квантователя, принимается решение об использовании классификатора. Варианты построения классификаторов рассмотрены в [2, 3].

В статье поэтапно описан процесс оценки, подробно рассмотрен метод быстрого поиска в кодовой книге как наиболее вычислительно сложная операция.

Решение задачи представления случайного процесса с заданной точностью конечным числом точек представления, рассмотрено во многих источниках [1, 2, 3]. Наиболее часто такая задача решается при помощи преобразования Карунена-Лоэва (КЛ), дискретно-косинусного преобразования и ортогонального преобразования с перекрытием. Рассмотрим разложение КЛ. Оно минимизирует среднеквадратичную ошибку, вносимую при учете конечного числа членов в бесконечном ряде разложения, а также минимизирует функцию эн-

тропии, определенную на дисперсиях случайных коэффициентов разложения [3]. В разложении КЛ случайный процесс $x(t)$, определенный во временной области $(0, T)$, может быть представлен линейной комбинацией базисных функций (1).

$$x(t) = \sum_{i=1}^{\infty} y_i \varphi_i(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

где базисные функции $\varphi_i(t)$ являются детерминированными функциями времени, а коэффициенты y_i – случайными величинами.

Чтобы образовать полную систему базисных функций $\varphi_i(t)$ требуется их бесконечное число, поэтому суммирование берётся до ∞ .

В разложении КЛ оптимальными функциями $\varphi_i(t)$ являются собственные вектора функции ковариации $R(t, \tau)$, они должны удовлетворять следующему интегральному уравнению (2):

$$\int_0^T R(t, \tau) \varphi_i(\tau) d\tau = \lambda_i \varphi_i(t), \quad i = 1, 2, \dots \quad (2)$$

где λ_i – собственные значения корреляционной функции $R(t, \tau)$.

Для дискретного случая, когда процесс представлен n точками преобразуем выражение (2) к виду (3)

$$\sum_{k=1}^n R(t_l, t_k) \varphi_i(t_k) = \lambda_i \varphi_i(t_l), \quad i, l = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

При этом минимальная среднеквадратичная ошибка определяется по (4).

$$\bar{\varepsilon}^2(m)_{opt} = \sum_{i=m+1}^n \lambda_i \quad (4)$$

где m – число учитываемых точек представления.

На рисунке 1 показан пример представления реализации случайного процесса.

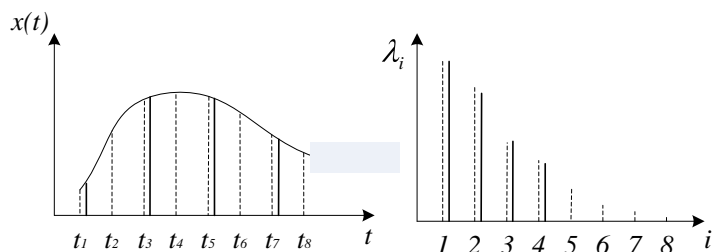


Рисунок 1 – Представление случайного процесса четырьмя точками – сплошные линии и восьмью – пунктирные, и соответствующие им значения собственных векторов

В итоге преобразования КЛ получим вектор меньшей размерности, который описывает источник ГМ с заданной ошибкой ε . Данный вектор можно рассматривать как реализацию некоторой n -мерной случайной величины, для которой задана n -мерная функция плотности распределения вероятности $f(x)$ на X^n . В работе [1] рассмотрен вопрос построения квантователя источника ГМ для разных размерностей с заданной ошибкой квантования.

Векторное квантование состоит в следующем. Предположим, что $\vec{x}(x_1, \dots, x_K)$ – K -мерный вектор представления случайного процесса. Операция векторного квантования, вектору x ставит в соответствие некоторый другой вектор \vec{c}_i . Вектор \vec{c}_i , называется кодовый вектор, выбирается из конечного множества векторов $C = \{\vec{c}_1, \vec{c}_2, \dots, \vec{c}_N\}$. Множество C называется кодовой книгой, а количество векторов в кодовой книге N называется её размером [1].

Опишем подробно метод быстрого поиска в кодовой книге являющийся основной вычислительной процедурой в векторном квантовании при решении задач в быстрой оценки источников ГМ. Одной из важнейших характеристик предлагаемого способа является его относительно низкая вычислительная сложность, которая является функцией от размерности пространства.

В многих работах [4, 5, 6, 7, 8] рассматривались проблемы поиска, в векторной книге. В [5] представлен ряд методов поиска по критерию минимума среднеквадратической ошибки, это способы полного перебора и относительно быстрые алгоритмы поиска путем дихотомического разделения кодовой книги. Наименьшую вычислительную сложность имеют методы, представленные в [6, 8], для поиска в которых используется диаграмма Вороного (ДВ) (рисунок 2). Процедура построения диаграммы Вороного на структуре данных подробно представлена в [7].

Метод, предложенный в [6], является наиболее эффективным по использованию вычислительных ресурсов, но так же является наиболее требовательным к ресурсам памяти. Предложенный способ можно рассматривать как усовершенствование [6], результатом которого является существенное снижение ресурсов памяти и уменьшение вычислительных затрат.

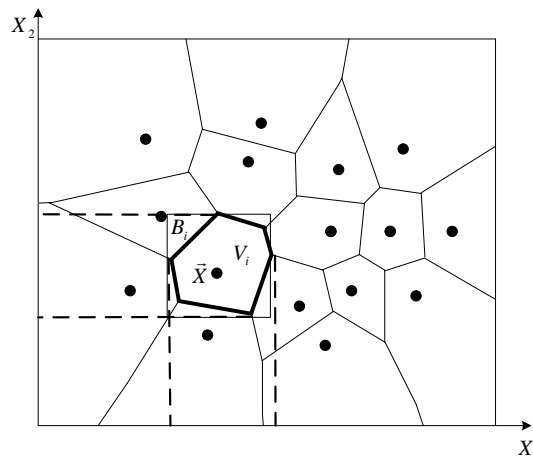


Рисунок 2 – Диаграмма Вороного для шестнадцати точек на плоскости, жирными линиями выделен многоугольник Вороного

Способ основан на информации о проекциях многоугольников Вороного V_i (рисунок 1). Многоугольник Вороного V_i связанный с вектором кодовой книги \vec{c}_i содержит все точки в пространстве R^K наиболее близкие к \vec{c}_i , чем к какому либо другому кодовому вектору. Таким образом, если кодовый вектор \vec{x} находится в многоугольнике V_i , то связанный кодовый вектор \vec{c}_i будет ближайшим.

Проекция многоугольника V_i на координатную ось j образует интервал P_i^j , с начальной и конечной точкой $(P_{i,L}^j, P_{i,U}^j)$. В итоге получим две гиперплоскости $g_j = P_{i,L}^j$ и $g_j = P_{i,U}^j$ нормальные к координатной оси j . K проекций $(P_{i,L}^j, P_{i,U}^j)$, на оси $j = 1, \dots, K$, определяют $2K$ гиперплоскостей которые ограничивают многоугольник вороного V_i наименьшим гиперпрямоугольником $B_i = \{x : (P_{i,L}^j \leq x_j \leq P_{i,U}^j), j = 1, \dots, K\}$. Для каждого многоугольника Вороного связанного с кодовым вектором можно построить такой гиперпрямоугольник, стороны которого будут параллельны осям координат.

Из предыдущего ясно $V_i \subseteq B_i$. Если $x \in V_i$, тогда $x \in B_i$. В случае если $x \in B_i$, соответствующий многоугольник Вороного V_i может также содержать x , и c_i может быть ближайшим к x . Гиперпрямоугольники могут пересекаться, и входной вектор может лежать сразу в нескольких прямоугольниках и каждый соответствующий им кодовый вектор может рассматриваться как возможный ближайший вектор. Это приводит к появлению набора кодовых векторов кандидатов, $C'(x) = \{c_i : x \in B_i\}$, каждый из которых может быть ближайшим. На этом наборе производится поиск полным перебором.

Предложенный метод поиска состоит из двух частей:

1. Предварительная обработка. Состоит из построения диаграммы Вороного на кодовой книге (рисунок 2) и построении структуры данных.
2. Поиск на сформированной структуре.

Рассмотрим подробно построение структуры данных. На первую из рассматриваемых осей строятся проекции всех N многоугольников Вороного V_i . Получим $N_1, N_1 = N$ перекрывающихся интервалов проекций, $P_i^1 = (P_{i,L}^1, P_{i,U}^1), i=1, \dots, N_1$, которые образуют $2N$ границ проекций $(y_1^1, y_2^1, \dots, y_{2N}^1)$ таких что $(y_1^1 \leq y_2^1 \leq \dots \leq y_{2N}^1)$. Эти границы разбивают рассматриваемую координатную ось на $(2N - 1)$ последовательных интервалов $\{I^1(1), I^1(2), \dots, I^1(2N - 1)\}$, где $I^1(m) = \{(y_m^1, y_{m+1}^1)\}$. Каждый интервалу соответствует набор $S^1(m)$ индексов многоугольников Вороного, чьи интервалы проекций частично или полностью перекрываются с $I^1(m)$.

Далее для каждого интервала $I^1(m) m=1 \dots (2N - 1)$ на следующую рассматриваемую ось строятся только проекции многоугольников Вороного, чьи интервалы проекций частично или полностью перекрываются с $I^1(m)$ т.е. входящих в набор $S^1(m)$. Получим $N_2 < N$ перекрывающихся интервалов проекций $P_i^2 = (P_{i,L}^2, P_{i,U}^2), i=1, \dots, N_2$. N_2 - определяется количеством векторов входящих в набор $S^1(m)$. В итоге получаются $2N_2$ границ проекций $(y_1^2, y_2^2, \dots, y_{2N_2}^2)$ таких что $(y_1^2 \leq y_2^2 \leq \dots \leq y_{2N_2}^2)$. Эти границы разбивают рассматриваемую координатную ось на $(2N_2 - 1)$ последовательных интервалов $\{I^2(1), I^2(2), \dots, I^2(2N_2 - 1)\}$, где $I^2(m) = \{(y_m^2, y_{m+1}^2)\}$. Каждый интервалу соответствует набор $S^2(m)$ индексов многоугольников Вороного, чьи интервалы проекций частично или полностью перекрываются с $I^2(m)$ и входят в набор $S^1(m)$.

Процедура повторяется, для каждого интервала $I^2(m) m=1 \dots (2N_2 - 1)$ на следующую ось строятся только проекции многоугольников Вороного из набора $S^2(m)$. Так последовательно рассматриваются все K осей.

В результате получится структура в виде дерева (рисунок 3). Процедура поиска реализуется в виде переходов по веткам дерева. Например, необходимо определить ближайший кодовый вектор к входному вектору $\vec{x}(x_1, \dots, x_K)$, последовательно для каждой компоненты вектора \vec{x} , определяется интервал который содержит данную компоненту $x_j \in I^1(m)$, $I^1(m) = \{(y_m^1, y_{m+1}^1)\}$, т.е. компонент вектора $\vec{x}_1 y_m^1 \leq x_1 \leq y_{m+1}^1$. На следующем этапе рассматривается поддерево, порожденное узлом $I^1(m)$, таким образом, рассматривается каждый компонент входного вектора, на последнем этапе x_K определяет концевой узел, который определяет итоговый набор $C'(x)$.

Вычислительная сложность предложенного метода Z_n для поиска одного тестового вектора:

$$Z_n = \sum_{i=1}^K \log 2N_i + \delta \cdot S, \tag{5}$$

где N_i изменяется, $N_i = N \dots N_K$, $N \dots N_K$ - число векторов претендентов оставшихся не исключенными после рассмотрения i -той оси;

S - конечное число в $C'(x)$ итоговом наборе векторов кандидатов, а δ - количество операций для вычисления расстояния до кодового вектора. Для сравнения вычислительная сложность метода Z предложенного в [6, 8].

$$Z = K \cdot \log 2 \cdot N + \delta \cdot C'(x). \tag{6}$$

Оценка использованной памяти M_n равна:

$$M_n = \prod_{i=1}^K (2N_i - 1), \tag{7}$$

для метода предложенного в [6, 8]

$$M = (2N - 1)^K. \quad (8)$$

Проведенные опыты показали, что для значений $K \leq 6$ реализация метода требует приемлемое количество для современных ЭВМ памяти.

Экспериментальные значения для конечного числа набора векторов S оставшихся в результате исключения представлены на рисунке 4.

Для случая, когда пространство, на котором строится ДВ дискретное и конечное, данная структура может быть представлена в виде конечного автомата. Тогда вычислительная сложность предложенного метода для поиска одного тестового вектора существенно уменьшается до

$$Z_n = d \cdot r + \delta \cdot S, \quad (9)$$

где r – одно считывание из таблицы переходов автомата.

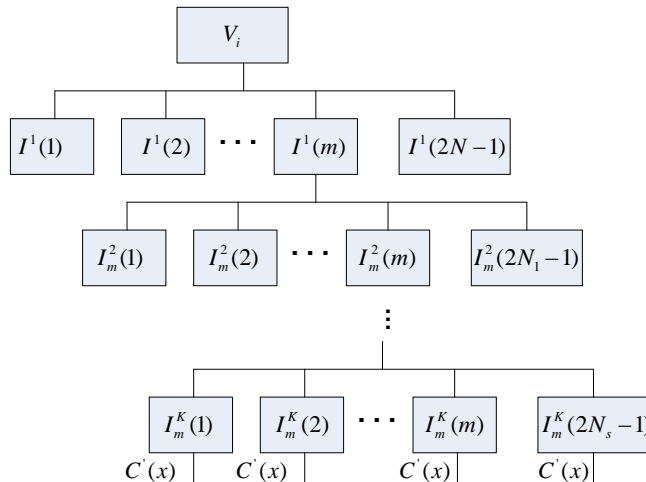


Рисунок 3 – Пример полученной структуры в виде дерева

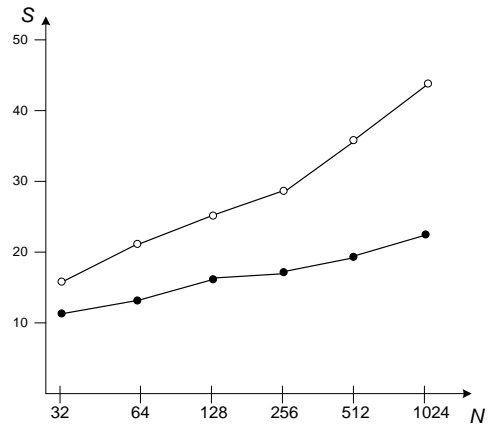


Рисунок 4 – Зависимость значения конечного числа S векторов в итоговом наборе от размера кодовой книги N

Таким образом, предложенный способ существенно уменьшает общую вычислительную сложность процесса оценки. Кроме того, тот факт что вычислительная сложность метода зависит от размерности кодовой книги, а не от количества содержащихся в ней векторов позволяет увеличивать число кодовых векторов в книге, тем самым снижая ошибку квантования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрков, К. В. Векторное квантование на основе кодов, исправляющих ошибки: Дисс....канд. техн. наук. / К. В. Юрков – М.: РГБ, 2008. –140 с.
2. Фукунага, К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. Пер. с англ./ К. Фукунага М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979, 368 стр.
3. Фу, К.С. Структурные методы в распознавании образов. / К.С. Фу - М.: Мир, 1977. – 320 с.
4. Препарата, Ф. Вычислительная геометрия: Введение: / Ф. Препарата, М. Шеймос Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 478 с.
5. Макхоул, Дж. векторное квантование при кодировании речи / Дж. Макхоул, С. Рукос, Г. Гиш // ТИИЭР. – 1985. – Т.73. - №11. – С. 19-61.
6. Cheng, D. Y. Fast search algorithms for vector quantization and pattern matching / D. Y. Cheng, A. Gersho, B. Ramamurthi, and Y. Shoham // Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing, Mar. 1984, vol. 1, pp. 9.11.1–9.11.4.
7. Загоруйко, Н. Г. Семейство алгоритмов локатор для быстрого поиска ближайшего аналога / Н. Г. Загоруйко, В. В. Дюбанов // Сибирский журнал индустриальной математики Октябрь–декабрь, 2006. Том IX, № 4(28)
8. Ramasubramanian Fast Nearest-Neighbor Search Based on Voronoi Projections and Its Application to Vector Quantization Encoding IEEE Transactions on speech and audio processing, vol. 7, no. 2, March 1999

Габдулгазиев Станислав Рамзисович
 Академия ФСО России, г. Орел
 Адъютант
 Тел.: 8-919-261-8688
 E-mail: 111222s@mail.ru

УДК 531.781

В.С. СЕЛИФОНОВ, С.А. ПРУДНИКОВ

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗИНОТКАНЕВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

В статье рассматривается конструкция устройства, позволяющего исследовать силовые характеристики лезвийной обработки поверхностей резиноканевых конвейерных лент.

Ключевые слова: динамометрическое устройство, тензодатчик, резиноканевая конвейерная лента, составляющие силы резания.

The article considers design of the device, which allows to investigate the power characteristics of the blade surface processing rubber conveyor belts.

Key words: dynamometer, strain-gage sensor, rubber conveyor belts, power characteristics.

Потребителями конвейерных лент (КЛ), являющихся тяговым и грузонесущим органом ленточных конвейеров являются предприятия, эксплуатирующие ленточные конвейеры. Эксплуатация данного вида изделия происходит в тяжёлых условиях, что ведёт к быстрому повреждению и даже разрушению непосредственно транспортирующего элемента [1]. Поэтому ремонт данного вида изделия является часто выполняемой работой при обслуживании конвейеров, позволяющей существенно продлить срок службы ленты. Анализ технической литературы показал наличие небольшого количества информации о возможностях механической обработки конвейерных лент, режимах резания и параметров качества поверхности. Такие исследования возможно провести на специальных установках, таких как динамометрические столы. Однако имеющееся на кафедре устройство (УДМ 1200) вызывает сложности по схеме закрепления, соответственно, возникает и сложность проведения экспериментов, получение необходимых данных. Отечественной промышленностью данные устройства не выпускаются, а зарубежные аналоги имеют высокую стоимость. В связи с этим возникла необходимость разработки и изготовления устройства, позволяющая исследовать данные зависимости.

В качестве режущего инструмента для проведения экспериментальных исследований используется цилиндрическая фреза диаметром $D=165$ мм. Материал рабочей части инструмента Р6М5, число зубьев фрезы $Z=3$. Геометрия режущей части инструмента: передний угол $\gamma=30^\circ$, угол заточки $\beta=45^\circ$, ширина фрезерования $B=50$ мм.

Испытания проводятся на образцах резиноканевой конвейерной ленты марки 2Т2-800-6-ТК-200-2-6-2-2-Т-2-Р6, где: 2Т2 (2 — тип конвейерной ленты; Т2 — класс резины наружных обкладок); 800 — ширина конвейерной ленты, (800) мм; 6 — количество прокладок; ТК-200-2 (тип ткани тяговой прокладки каркаса с прочностью по основе, Н/мм; синтетическая ткань; прочность ткани 200 н/мм); 6 — толщина наружных обкладок ленты (6 мм); 2 — толщина нерабочей части обкладки (2 мм). Температура окружающего воздуха, при которой эксплуатируется данная конвейерная лента: от -10 до $+60^\circ\text{C}$, размеры образцов ленты $165 \times 155 \times 14$ мм.

Для исследования силовых характеристик процесса механической обработки конвейерной ленты (фрезерование) используется автоматизированная система научных исследований (АСНИ), разработанная и изготовленная в Брянском государственном техническом университете на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты», структурная схема которой представлена на рисунке 1, а общий вид АСНИ на рисунке 2. АСНИ включает в себя: горизонтально фрезерный станок 1, на рабочем столе 6 которого устанавливается динамометр 5 с закреплённым образцом 4. В процессе обработки материала сигнал с динамометрического устройства по соединительным проводам 7 поступает на усилитель 8, где происходит усиления и преобразование сигнала в двоичный код. Далее усиленный сигнал выводится на экран ЭВМ.

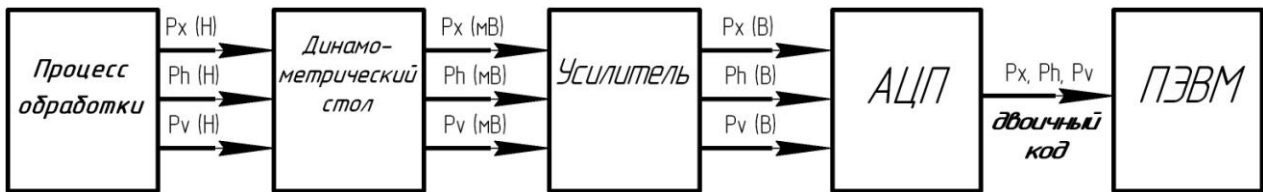


Рисунок 1 – Структурная схема АСНИ
 P_x – осевая составляющая силы резания (Н);
 P_h – горизонтальная составляющая силы резания (Н);
 P_v – вертикальная составляющая силы резания (Н)



Рисунок 2 – Общий вид автоматизированной системы научных исследований (АСНИ): 1 – горизонтально фрезерный станок;
 2 – режущий инструмент; 3 – оправка; 4 – образец;
 5 – Блок преобразователей (динамометрическое устройство-динамометр);
 6 – рабочий стол; 7 – соединительные провода; 8 – усилитель LTR 212 с АЦП;
 9 – персональный компьютер

В качестве первичного преобразователя сигнала используется динамометрическое устройство, разработанное и изготовленное в лаборатории кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» (рисунок 3) выполненный на основе конструкции динамометра УДМ 1200 [2]. Разработанный и изготовленный динамометрический стол обеспечивает передачу силы резания с заготовки (фрезерование, сверление, прошивание) на державку, выполненную в виде квадратной пластины с прямоугольным фланцем на верхней части для закрепления на ней рабочего стола, который в свою очередь необходим для закрепления обрабатываемого образца конвейерной ленты (рисунок 2).

Основанием для динамометра служит плита 1, к которой с помощью винтов (условно обозначены) крепятся боковины 2. Для получения сигнала используется датчик силы, состоящий из корпуса, к которому наклеивается тензодатчик, с базовой длиной 15 мм предназначенный для передачи сигнала на усилитель; силовоспринимающей поверхности в виде сферы, расположенной непосредственно на датчике силы (позициями не обозначены). На опоры (датчики силы), оси которых расположены вертикально, наклеено по одному датчику, которые соединены в схему измерения силы P_z . На опоры, оси которых расположены горизонтально, наклеено по 2 датчика, соединённые между собой для измерения сил P_x и P_y . Датчик силы устанавливается в направляющую втулку 9 а затем данная конструкция уста-

навливается в стакан 8 и далее в корпус динамометра, в котором стакан фиксируется контргайкой 7. На датчики силы устанавливается державка 3 к державке крепится прямоугольный фланец 6, предназначенный для закрепления рабочего стола 4. Рабочий стол имеет систему координатных отверстий, благодаря которым образец конвейерной ленты крепится к рабочему столу 4 с помощью винтов и прихватов через отверстия М12. Для ориентации динамометра на столе горизонтально-фрезерного станка служит призматическая шпонка 11. Данный динамометр пригоден не только для исследования процесса резания резиноканевых конвейерных лент, но и для изучения силовых характеристик, возникающих при фрезеровании, сверлении и других видах обработки материалов. Общий вид динамометрического устройства приведён на рисунке 4.

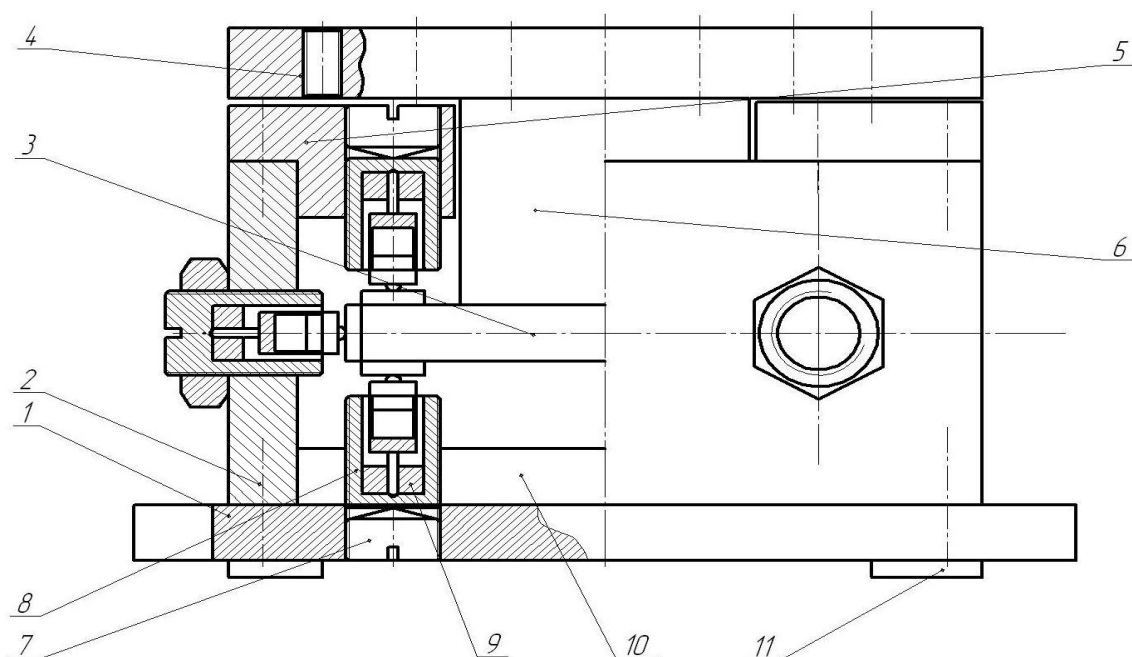


Рисунок 3 – Конструкция спроектированного динамометра
1 – основание; 2 – стойка; 3 – опорный стол; 4 – рабочий стол;
5 – верхняя стяга; 6 – державка; 7 – контргайка; 8 – стакан;
9 – втулка; 10 – плита; 11 – шпонка



Рисунок 4 – Общий вид динамометрического устройства

Для автоматизации записи данных при проведении исследований используются следующие аппаратные и программные средства: усилитель сигнала, необходимый для усиления и преобразования выходного сигнала с первичных преобразователей (динамометрического

устройства), персональный ЭВМ для вывода сигнала на экран. Датчики стоящие в динамометре соединены по полумостовой схеме, вторая половина которой выполнена в АЦП на прецизионных резисторах. АЦП представляет собой крейт LTR (производства фирмы L-CARD) с установленным в нем модулем LTR212. Это специализированный модуль АЦП для подключения полу-мостовых и мостовых тензодатчиков, имеющий источник опорного напряжения и возможностью подключения до 8 каналов измерений (рисунок 5).

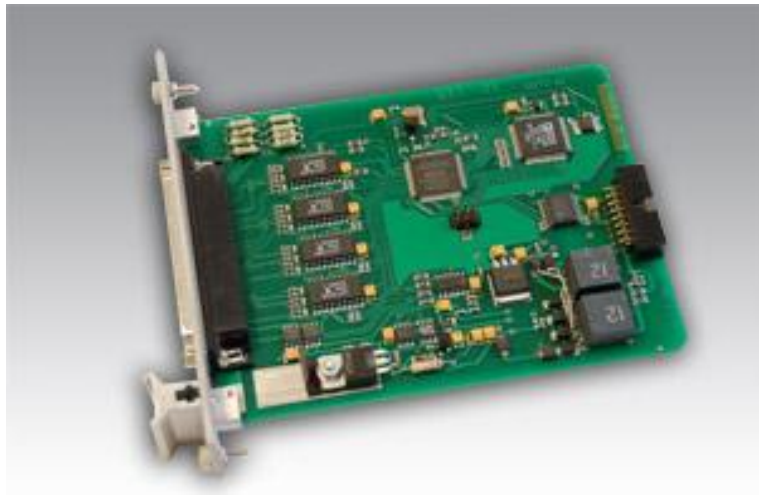


Рисунок 5 – Модуль LTR 212

Крейт соединен с ЭВМ посредством проводов через USB –канал. На ЭВМ установлено специальное программное обеспечение: программа сервер для взаимодействия программ клиентов с физическими модулями LTR, и программа клиент, работающая через программу сервер с логическим модулем LTR. В качестве программы клиента написана программа, использующая следующие библиотеки функций [3] (функции инициализации, конфигурирования, сбора данных, калибровки, и др.), позволяющая фиксировать текущие значения сил резания (визуально в виде графика и численно) и записывать их в текстовый файл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высочин, Е. М. Стыковка и ремонт конвейерных лент на предприятиях чёрной металлургии /Е. М. Высочин, Е. Х. Завгородний, В. И. Заренков. – М.: Металлургия, 1989 – 192 с.
2. Руководство к универсальному динамометру конструкции ВНИИ, М.: -1965. -20 с.
3. Милованов, А.Н. Библиотека пользовательского интерфейса модуля LTR212, М.: 2005. – 38 с.

Селифонов Виталий Сергеевич

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Соискатель кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»
Адрес: г. Брянск, Б-р 50 летия Октября, д.7
Тел. (4832) 588289
E-mail: msi@tu-bryansk.ru

Прудников Сергей Александрович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Инженер-программист кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»
Адрес: г. Брянск, Б-р 50 летия Октября, д.7
Тел. (4832) 588289
E-mail: msi@tu-bryansk.ru

ВЫДЕЛЕНИЕ СЕГМЕНТОВ КВАЗИСТАЦИОНАРНОСТИ ПРИ АНАЛИЗЕ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА В ВОКОДЕРАХ С ЛИНЕЙНЫМ ПРЕДСКАЗАНИЕМ

В данной статье рассмотрено решение задачи выделения сегментов квазистационарности при анализе речевого сигнала в вокодерах с линейным предсказанием. Предлагаемый способ может быть использован для эффективного кодирования речевых сигналов в системах телеинформационных коммуникаций с переменной скоростью передачи.

Ключевые слова: линейное предсказание, сегмент квазистационарности, речевой сигнал, вокодер, эффективное кодирование.

In given article the decision of a nearby stationarity segments allocation problem is considered at the analysis of a speech signal in vocoders with a linear prediction. The offered way can be used for effective coding of speech signals in systems of teleinformation communications with variable speed of transfer.

Key words: the linear prediction, a segment of nearby stationarity, a speech signal, vocoder, effective coding.

В настоящее время основополагающей тенденцией развития систем связи является широкое использование информационных технологий в различных областях телекоммуникаций. Переход к цифровым сетям связи и пакетной передаче данных позволил предоставить пользователям более широкий спектр защищенных услуг. При этом достаточно большую часть телетрафика в различных приложениях составляет передача речевых сигналов.

Основной проблемой цифрового представления речевого сигнала является задача качественного и компактного кодирования данных для их передачи по цифровым каналам связи. Решение этой проблемы позволит в условиях заданного критерия качества связи увеличить пропускную способность линейных трактов и каналов передачи. Часто в некоторых задачах кодирования речевого сигнала предполагается снизить скорость передачи при сохранении качественных показателей ее восприятия. Широкое распространение в инфокоммуникациях в настоящее время получили методы кодирования речевых данных с переменной скоростью передачи и асинхронным вводом в канал связи.

Среди многообразия методов кодирования речевых сигналов одним из наиболее эффективных является метод линейного предсказания. Метод линейного предсказания речи принадлежит к классу методов, использующих модель речевого сигнала в виде отклика линейной системы с переменными параметрами (голосового тракта) на соответствующий сигнал возбуждения (порождающий сигнал). Анализатор речепреобразующего устройства выделяет из короткого сегмента речевого сигнала параметры состояния линейной системы и сигнала возбуждения, позволяющие синтезатору восстановить исходный сигнал с требуемой степенью верности.

Сущность метода линейного предсказания заключается в том, что выборка речевого сигнала $S(n)$ может быть приблизительно предсказана линейной комбинацией предшествующих отсчетов этого сигнала (1):

$$S'(n) = \sum_{i=1}^K b_i S_{n-i} + e(n), \quad (1)$$

где $S'(n)$ - предсказанное значение речевого сигнала;

b_i - весовой коэффициент или коэффициент линейного предсказания;

K - число коэффициентов линейного предсказания или порядок предсказания [1].

Параметры речевого сигнала изменяется с течением времени медленно, что позволяет рассматривать речевой сигнал как стационарный во временные интервалы порядка 2,5-30 мс,

называемые окнами. Возможность линейного прогнозирования текущего отсчета объясняется наличием значительных корреляционных связей между отсчетами речевого сигнала при его равномерной дискретизации. В вокодерах, основанных на методе линейного предсказания (липредерах), порядок предсказания, как правило, является постоянным, а значения коэффициентов b_i фиксируются на коротких, примыкающих друг к другу и равных по длительности временных интервалах. При этом исходный речевой сигнал рассматривается как совокупность отрезков стационарных случайных последовательностей, каждый из которых порождается системой с постоянными параметрами. Специальные вычислительные приемы позволяют снизить нежелательное влияние переходных процессов, возникающих при переходе от одного отрезка к другому [2]. Такой подход основан на гипотезе о локально-стационарном характере процесса речеобразования, которая позволяет оценивать изменения параметров или вероятностных характеристик нестационарного речевого сигнала на основе моделей, инвариантных к временному сдвигу.

Передаточная характеристика синтезирующей линейной дискретной динамической системы в Z -области имеет вид:

$$H(Z) = \frac{G}{A(Z)} = \frac{G}{1 - \sum_{i=1}^K b_i * Z^{-i}}, \quad (2)$$

где $A(Z)$ – передаточная характеристика ЛДДС инверсной фильтрации (анализирующего фильтра);

G – коэффициент усиления речевого сегмента.

Структурная схема рекурсивного цифрового фильтра, соответствующего (2), представлена на рисунке 1.

Задача анализа речевого сигнала методом линейного предсказания заключается в его фильтрации линейной системой с передаточной характеристикой $A(Z)$:

$$A(Z) = 1 - \sum_{i=1}^K b_i * Z^{-i} \quad (3)$$

которая соответствует линейно-разностному уравнению вида:

$$e(n) = S(n) - S'(n) = S(n) - \sum_{i=1}^K b_i * S(n-i), \quad (4)$$

где $e(n)$ – временные отсчеты сигнала ошибки линейного предсказания.

Анализ (2) и (3) говорит о том, что совпадение синтезированного РС $S'(n)$ с оригиналом обеспечивается при условии равенства множеств $\{b\}$ на этапах анализа и синтеза речи и равенства порождающего сигнала и сигнала ошибки предсказания $e(n)$ в (4).

Следует отметить, что последовательность, удовлетворяющая линейно-разностному уравнению (4), является авторегрессионной, так как $S(n)$ совпадает с условным математическим ожиданием $M\{S(n)/S(n-1), S(n-2), \dots, S(n-K)\}$ или, иначе говоря, с регрессией $S(n)$ по $S(n-1), S(n-2), \dots, S(n-K)$.

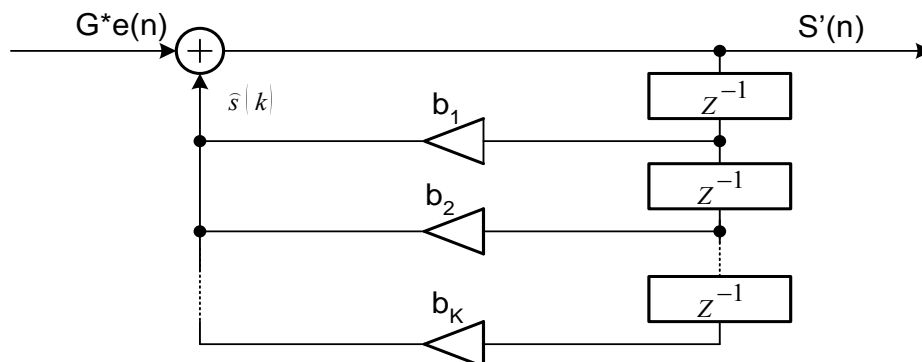


Рисунок 1 – Структурная схема синтезирующего фильтра

является теплицевой [5], т.е. симметричной и такой, что элементы главной диагонали и элементы, лежащие на параллелях к ней, соответственно равны между собой. Очевидно, что теплицева матрица является невырожденной (ее определитель отличен от нуля), а следовательно – система уравнений (7) является не только совместной, но и определенной, что означает единственность решения относительно b .

Известны и описаны различные способы линейного предсказания, отличающиеся видом сигнала возбуждения и параметрами описывающими состояния линейной формирующей системы [6].

Недостатками представленных способов является относительно высокая скорость передачи при заданном качестве синтеза речевого сигнала, а также значительное расходование информационного ресурса на представление параметров, описывающих передаточную функцию голосового тракта, что объясняется тем, что выделение и кодирование этих параметров осуществляют на каждом фиксированном интервале квазистационарности.

В устройствах, реализующих данные методы, осуществляется анализ речевого сигнала на участке квазистационарности, который по разным оценкам составляет 2,5-30 мс., при этом, по каналу связи передается информация о коэффициентах формирующей модели, параметрах, характеризующих сигнал возбуждения и кодируемый речевой сигнал. На данном участке сигнал принято считать близким к стационарному, вследствие чего он получил название квазистационарный.

На практике используют фиксированные сегменты речевого сигнала на основании которых рассчитывают параметры состояния линейной системы и сигнала возбуждения, позволяющие синтезатору восстановить исходный сигнал с требуемой степенью верности, при этом входные отсчеты речевого сигнала разделяются на сегменты фиксированной длины (80, 160 или 320 отсчетов), для каждого из сегментов рассчитывают коэффициенты формирующей модели, а затем кодируют с использованием алгоритма линейного предсказания с возбуждением от кода. На наш взгляд недостатком предложенного подхода является использование фиксированной длительности сегмента квазистационарности при использовании кодирования на основе линейного предсказания с возбуждением от кода, что не всегда соотносится с природой формирования речевого сигнала.

Выбор длины данного сегмента является весьма важной задачей. Его увеличение приводит к уменьшению скорости передачи в канале связи, а сокращение к повышению качественных характеристик синтезируемого сигнала, так как сигнал становится близким к стационарному, и, уменьшению времени задержки сигнала на обработку. Анализ речевого сигнала на фиксированном выбранном сегменте квазистационарности является достаточно грубым допущением, так как за пределами сегмента сигнал представляется равным нулю, что не соответствует действительности и приводит к появлению искажений на стыках сегментов при их анализе и кодировании, а также искажений в восприятии синтезированного речевого сигнала на приеме, при этом на вокализованных участках речи длина сегмента стационарности может быть увеличена, что связано с линейным характером образования речевого сигнала на этом участке, а на шумоподобных участках желательно ее уменьшать, так как речевой сигнал в данном случае имеет нестационарные свойства. Деление речевого сигнала на вокализованные и шумоподобные (невокализованные) сегменты достаточно широко используется в технике эффективного речевого кодирования.[6] В результате применения предлагаемого способа налицо снижение требуемой скорости передачи при сохранении качественных показателей синтезированного речевого сигнала.

Сущность предлагаемого способа заключается в следующем. Выполняют анализ на основе линейного предсказания поступающего на вход вокодера речевого сигнала деля его на сегменты по 20 миллисекунд, если принимают решение о том, что сигнал является активной речью. Выделяют переход огибающей сигнала через нулевое значение и от положения отсчета со значением наиболее близким нулю выбирают длину сегмента соответствующую 20 миллисекундам и рассчитывают значение частоты основного тона и сигнала тон-шум, если принимают решение о вокализованности анализируемого сигнала, то увеличивают длитель-

ность сегмента квазистационарности на количество отсчетов кратное периоду основного тона, но не более чем на 60 миллисекунд с обязательной проверкой на вокализованность следующих сегментов по 20 миллисекунд. Если принимают решение о шумоподобности следующего сегмента, то границу сегмента анализа выбирают кратной количеству отсчетов на периоде основного тона, но не более половины следующего сегмента длительностью 20 миллисекунд, если принимают решение о шумоподобности анализируемого сегмента, то длину сегмента анализа уменьшают, при этом границу сегмента формируют на значении близком нулю и кратном вычисленному периоду основного тона.

При таком подходе с высокой вероятностью можно утверждать, что начальный и конечный отсчеты во вновь сформированном сегменте будут иметь значения близкие нулю, что значительно уменьшит возможные искажения на стыках сегментов.[7]

В большинстве вокодеров с линейным предсказанием в качестве одного из параметров входящих в кадр передачи является частота основного тона говорящего, таким образом использование данного параметра в качестве одного из критериев формирования границ сегмента квазистационарности речевого сигнала не приведет к повышению скорости передачи в таких вокодерах, а существенно сократит ее, при этом повышается качество синтезированной речи на выходе вокодера с линейным предсказанием, так как отсчеты на стыках сегментов квазистационарности имеют практически нулевую энергию. В некоторых методах линейного предсказания частота основного тона говорящего не передается в кадре передачи, для таких методов данный параметр будет дополнительным, что снизит эффект от внедрения предлагаемого способа, однако общий выигрыш от ее использования будет достаточно велик. Методы выделения частоты основного тона речевого сигнала хорошо известны и нашли широкое распространение в речевом кодировании.[6].

Алгоритм выделения сегментов квазистационарности при анализе речевого сигнала в вокодерах с линейным предсказанием представлен на рисунке 3. На рисунке 4 показана функциональная схема устройства, реализующего способ выделения сегментов квазистационарности при анализе речевого сигнала в вокодерах с линейным предсказанием.

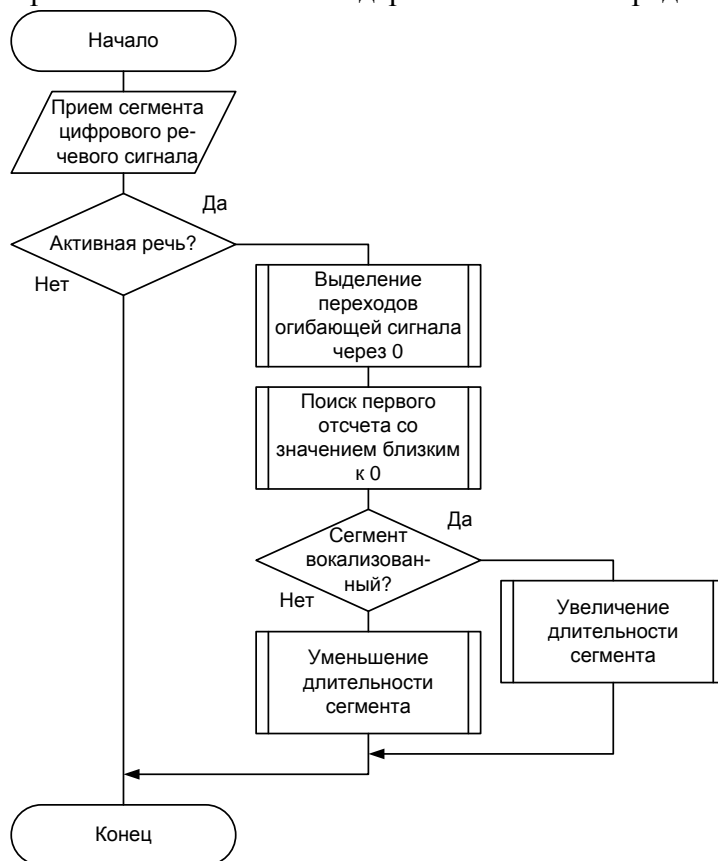


Рисунок 3 – Алгоритм выделения сегментов квазистационарности при анализе речевого сигнала в вокодерах с линейным предсказанием

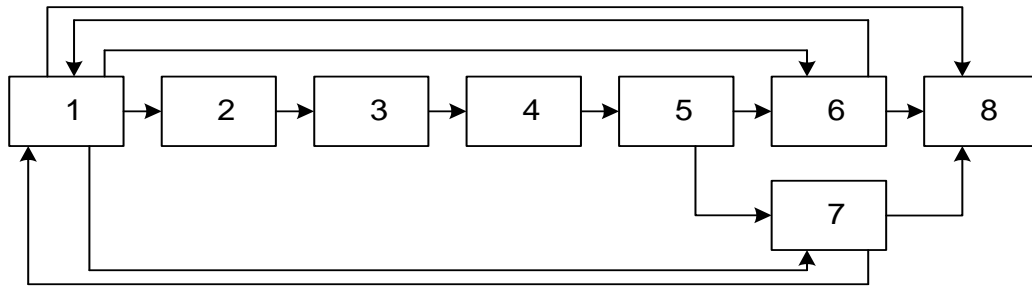


Рисунок 4 – Функциональная схема устройства, реализующего способ выделения сегментов квазистационарности при анализе речевого сигнала в липредерах

1. Блок приема сегмента цифрового речевого сигнала; 2. блок анализа текущего сегмента на присутствие активной речи, 3. блок выделения перехода огибающей речевого сигнала через нулевое значение, 4. блок поиска отсчета со значением наиболее близким к нулевому, 5. блок выделения сигнала тон-шум и вычисления значения частоты основного тона, 6. блок увеличения длительности сегмента, 7. блок уменьшения длительности сегмента, 8. получатель сегмента цифрового речевого сигнала.

Использование данного способа для выделения сегментов квазистационарности при анализе речевого сигнала в вокодерах с линейным предсказанием будет рационально для класса систем кодирования речевого сигнала с переменной скоростью передачи.

Такой подход позволяет значительно снизить требуемую пропускную способность каналов связи для функционирования вокодеров с линейным предсказанием, при этом качественные показатели синтезированного сигнала значительно повышаются.

Рассмотрим функционирование данного устройства. Оно состоит из блока приема сегмента цифрового речевого сигнала 1, который связан с блоком увеличения длительности сегмента 6, блоком уменьшения длительности сегмента 7, получателем сегмента цифрового речевого сигнала 8, а также с блоком анализа текущего сегмента на присутствие активной речи 2, который связан с блоком выделения перехода огибающей речевого сигнала через нулевое значение 3, информация с которого подается на блок поиска отсчета со значением наиболее близким к нулевому 4, который связан с блоком выделения сигнала тон-шум и вычисления значения частоты основного тона, который связан с блоком 6 и блоком 7, которые связаны с блоком 8, а также блоком 1.

Устройство функционирует следующим образом. На блок 1 поступает сегмент цифрового речевого сигнала длительностью 20 мс. Блок 2 анализирует сигнал на присутствие активной речи. Если он принимает решение "пауза", то длительность сегмента остается неизменной, и он передается в блок 8, иначе блок 3 производит выделение перехода огибающей речевого сигнала через нулевое значение и затем блок 4 осуществляет поиск отсчета со значением наиболее близким к нулевому. Далее сигнал поступает в блок 5, который выделяется сигнал тон-шум и вычисляет частоту основного тона. Если в блоке 5 принято решение, что сегмент вокализованный, то вычисляется частота основного тона и в соответствии с информационными параметрами получаемыми с блока 5 блок 6 увеличивает длительность сегмента квазистационарности на количество отсчетов кратное периоду основного тона, но не более чем на 60 миллисекунд с обязательной проверкой на вокализованность следующих сегментов по 20 миллисекунд, если следующий сегмент является шумоподобным, то граница сегмента анализа выбирается кратной количеству отсчетов на периоде основного тона, но не более половины следующего сегмента длительностью 20 миллисекунд. Блок 6 напрямую взаимодействует с блоком 1 и получает от него необходимое количество отсчетов для увеличения длительности сегмента, который затем направляется в блок 8. Если в блоке 5 принято решение о том, что сегмент шумоподобный, то блок 7 уменьшает длину сегмента анализа. При этом последний отсчет сегмента формируется на значении близком к нулю, а длина сегмента выбирается кратной периоду основного тона. Оставшееся количество отсчетов направляется в блок 1, с которым блок 7 связан напрямую. Измененный сегмент направляется в блок 8.

К достоинствам использования предлагаемого способа следует отнести тот факт, что изменение длительности сегментов квазистационарности при анализе речевого сигнала в вокодерах с линейным предсказанием дает возможность уменьшить среднюю скорость передачи в вокодерах с линейным предсказанием, функционирующих с переменной скоростью передачи.

Использование предлагаемого способа дает возможность понизить среднюю скорость передачи данных в канале связи по сравнению с известными решениями, в которых применяется фиксированный сегмент квазистационарности речевого сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркел, Дж. Д. Линейное предсказание речи / Дж. Д. Маркел, А.Х. Грэй. – М.: Связь, 1980. – 308с.
2. Назаров, М.В. Методы цифровой обработки и передачи речевых сигналов / М.В. Назаров, Ю.Н. Прохоров. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.
3. Цыпкин, Я.З. Информационная теория идентификации / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 336 с.
4. Рабинер, Л.Р. Цифровая обработка речевых сигналов / Л.Р. Рабинер, Р.В. Шафер. – М.: Радио и связь, 1981. – 496 с.
5. Воеводин, В.В. Вычислительные процессы с теплицевыми матрицами / В.В. Воеводин, Е.Е. Тыртышников. – М.: Наука, 1987. – 124с.
6. О.И. Шелухин, Н.Ф. Лукьянцев Цифровая обработка и передача речи. М., Радио и Связь, 2000г. – С. 102-112, С. 123-146, патенты RU № 2233010 от 27.01.1999, US №6385577 от 07.05.2002
7. А.А. Афанасьев, М.Ю.Конышев, И.В.Ульянов. Патент на изобретение №2374653 от 27.11.2009г.

Афанасьев Андрей Алексеевич

Академия ФСО России, г. Орел

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела

Тел. (8-4862) 41-99-47

E-mail: andreycka@nekto.ru

Трубицын Владимир Геннадьевич

Академия ФСО России, г. Орел

Преподаватель кафедры «Автоматизированных систем обработки информации и управления»

Тел. (8-4862) 41-99-32

Ю.А. ДЕМИНА

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОЗДУШНОГО ТЕРМОСТАТА С МОДУЛЯМИ ПЕЛЬТЬЕ

В данной статье рассматривается математическое моделирование элементов устройства воздушного термостата, выполненного на термоэлектрическом модуле Пельтье, на примере термостатирования воздушного объема барокамеры испытательного стенда для контроля приборов с термочувствительными элементами манометрического типа.

Ключевые слова: Моделирование теплообмена в технических системах, автоматизация технологических процессов, применение термоэлектрических модулей Пельтье, оптимизация конструкции термостата, моделирование аэродинамических процессов.

In given article are considered mathematical modelling elements of the device of the air thermostat which executed on thermoelectric module Pelte, on an example of temperature installing of air volume of a pressure chamber of the test bed for the control of devices with thermosensitive elements of manometrical type.

Key words: heat exchange modelling in technical systems, automation of technological processes, application of thermoelectric modules Pelte, optimisation of a design of the thermostat, algorithm of the control of temperature regulators, modeling aerodynamic process.

Термоэлектрические модули (ТЭМ) на основе полупроводниковых элементов с эффектом Пельтье находят широкое применение в испытательных стендах по контролю качества изделий электронной техники и приборостроения. На их основе создаются комбинированные термокамеры различного назначения. ТЭМ как правило снабжаются теплоотводами в виде пластинчатых радиаторов с принудительным обдувом вентиляторами (кулеры) для интенсификации теплообмена с окружающей средой.

Современные термоэлектрические модули и пластинчатые радиаторы с встроенными вентиляторами широко представлены на рынке как отечественными, так и зарубежными производителями.

В данной статье рассматриваются отдельные вопросы математического моделирования такого кулера для ТЭМ специальной термостатируемой барокамеры, предназначенной для контроля приборов с термочувствительными элементами манометрического типа.

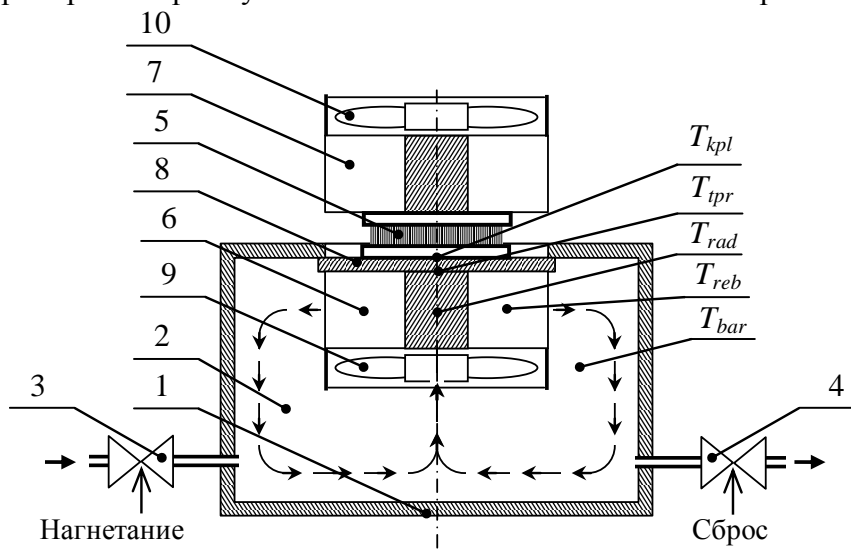


Рисунок 1 – Специальная барокамера-термостат (в разрезе)
 1 – стенка барокамеры; 2 – воздушный объем барокамеры;
 3, 4 – клапаны нагнетания и сброса воздуха; 5 – термоэлектрический модуль (ТЭМ);
 6, 7 – радиаторы; 8 – теплопровод; 9, 10 – вентиляторы

Рассмотрим барокамеру-термостат, изображенную на рисунке 1, где введены следующие обозначения: T_{bar} – воздушная среда барокамеры; T_{reb} – основание ребра радиатора, T_{radl} – центр радиатора, T_{tpr} – поверхность теплопровода в месте крепления радиатора; T_{kp} – внешняя поверхность ТЭМ.

Возмущающее воздействие на температуру воздушной среды барокамеры и, следовательно, исследуемого объекта, возникает за счет тепловых потоков от стенок барокамеры и объемных тепловыделений, связанных с работой расширения или сжатия воздуха при изменении давления воздушной среды барокамеры.

При формировании **математической модели газодинамических процессов** будем рассматривать два одновременно протекающих процесса.

1. Процесс изменения давления в постоянном объеме барокамеры с переменным весовым количеством воздуха, нагнетаемого или сбрасываемого через управляемые клапаны:

$$\frac{d}{dt} P = \frac{R \cdot T}{V} \cdot (G_n - G_c), \quad (1)$$

где P, T – давление (Н/м^2) и температура ($^{\circ}\text{К}$) воздуха в объеме барокамеры;

R – газовая постоянная, для воздуха $R = 287,1 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$;

V – объеме барокамеры, м^3 ;

G_n, G_c – массовый расход через клапаны нагнетания и сброса, кг/с .

2. Процесс изменения воздушного потока G в аэродинамическом контуре барокамеры в условиях изменения плотности воздуха. Математическая модель процесса описывается системой математических моделей элементов контура:

$$\begin{cases} \Delta p = \rho \cdot \sum_i \xi_{m_i} \cdot \frac{G^2}{2 \cdot S_i^2} \\ G = \frac{\omega}{\omega_r} \cdot F_r \left(\left(\frac{\omega_r}{\omega} \right) \cdot \Delta p \right) \\ C \cdot \frac{U}{R} \cdot K_{EM} \cdot \omega - D \cdot \frac{1}{R} \cdot K_{EM}^2 \cdot \omega^2 = \Delta p \cdot G \cdot \rho \end{cases} \quad (2)$$

где $\rho = \frac{P}{R \cdot T}$ – плотность воздуха в объеме барокамеры, кг/м^3 ;

ξ_{m_i} – коэффициент местного сопротивления i -го участка контура;

S_i – площадь сечения проточной части i -го участка контура, м^2 ;

ω – скорость вращения вентилятора, рад/с ;

U – электрическое напряжение на обмотках электродвигателя, В;

R – электрическое сопротивление обмотки электродвигателя, Ом;

K_{EM} – электромеханическая характеристика электродвигателя;

C, D – коэффициенты поправок, учитывающие особенности применения электродвигателей с вентильным управлением.

В системе уравнений (2) первое уравнение выражает падение давления Δp (Н/м^2) на гидравлическом сопротивлении контура циркуляции воздушного потока величиной G ($\text{м}^3/\text{с}$). Второе уравнение является уравнением зависимости воздушного потока G , создаваемого лопастным колесом вентилятора в аэродинамическом контуре барокамеры, от скорости вращения вентилятора ω . Уравнение составлено на основе регулировочной номинальной характеристики вентилятора $G = F_r(\Delta p)|_{\omega=\omega_r}$ и законов подобия лопастных машин. Третье уравнение связывает мощность на валу электродвигателя вентилятора – левая часть, с мощностью отдаваемую лопастным колесом вентилятора воздушному потоку – правая часть уравнения.

Система уравнений (2) решается относительно переменных $\Delta p, G, \omega$ при заданном значении плотности воздуха в объеме барокамеры.

Для анализа процессов теплопередачи, протекающих в радиаторе, разобьем его на конечные объемы. Каждый объем заменим близким простым телом классической формы и представим температурным узлом T_i .

Составим математическую модель теплообмена между элементами радиатора расположенного внутри барокамеры (математическая модель второго радиатора строится аналогично):

$$C_{reb} \cdot \frac{dT_{reb}}{dt} + g_{reb,bar} \cdot (T_{reb} - T_{bar}) + g_{reb,rad} \cdot (T_{reb} - T_{rad}) + g_{reb,tpv} \cdot (T_{reb} - T_{tpv}) = 0, \quad (3)$$

$$C_{rad} \cdot \frac{dT_{rad}}{dt} + g_{rad,reb} \cdot (T_{rad} - T_{reb}) + g_{rad,tpv} \cdot (T_{rad} - T_{tpv}) = 0, \quad (4)$$

$$C_{tpv} \cdot \frac{dT_{tpv}}{dt} + g_{tpv,rad} \cdot (T_{tpv} - T_{rad}) + g_{tpv,reb} \cdot (T_{tpv} - T_{reb}) + g_{tpv,kp} \cdot (T_{tpv} - T_{kp}) = 0, \quad (5)$$

где $g_{i,j}$ – теплопроводность между i -м и j -м телом;

C_{rad} – теплоемкости радиаторов, Дж/К;

C_{reb} – теплоемкости ребер радиатора, Дж/К;

C_{tpv} – теплоемкости теплопровода, Дж/К.

Если температурные узлы соединить элементами тепловой схемы вида $R C$, получим следующую схему (рисунок 2).

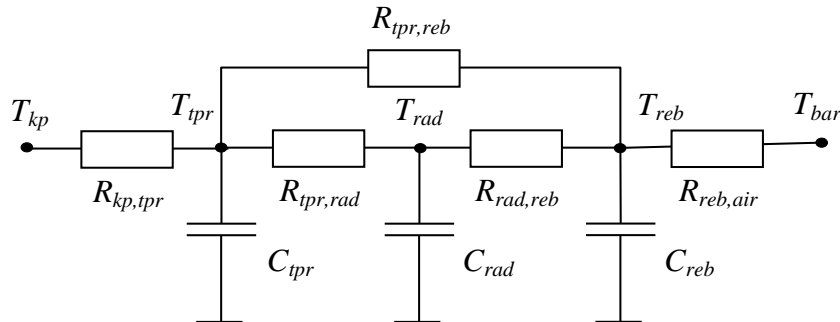


Рисунок 2 – Тепловая схема, моделирующая нестационарное распределение температуры в радиаторе с теплообменом боковой поверхностью со средой

Отметим, что величина соответствующих проводимостей $g_{i,j}$ в системе уравнений (3-5) равна:

$$g_{i,j} = 1/R_{i,j}. \quad (6)$$

Теплоемкость элементов радиатора:

$$C_i = c_i \cdot M_i, \quad (7)$$

где c_i – удельная теплоемкость материала элемента радиатора, Дж/кг;

M_i – масса элемента, кг.

Для улучшения контактирования поверхностей в сборке модуля ТЭМ и снижения температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) может быть использовано заполнение контактных зон средой, имеющей теплопроводность близкую к теплопроводности металла.

При давлении контактирующих поверхностей ниже $(6,86 - 7,66) \cdot 10^6$ Н/м² наибольший эффект дает применение смазки КПТ-8 на основе окиси бериллия [коэффициент теплопроводности $\lambda_{kpt} = 0,7 \dots 0,8$ Вт/(м⁰С)].

Расчет теплового сопротивления теплопроводящего материала (в качестве данного материала взята паста КПТ-8):

$$R_{kpt} = \frac{\delta_{kpt}}{\lambda_{kpt} \cdot S}, \quad (8)$$

где $\delta_{kpt} = (0 \div 100) \cdot 10^{-6}$ м – толщина слоя пасты КПТ-8;

S – площадь сопрягаемой поверхности, м.

$$R_{kp, tpr} = R_{kpt} + R_{tpr}, \quad (9)$$

$$R_{tpr, rad} = R_{kpt} + R_{rad}, \quad (10)$$

$$R_{tpr, reb} = R_{kpt} + R'_{tpr, reb}, \quad (11)$$

$$R_{rad, reb} = R_{kpt} + R'_{rad, reb}, \quad (12)$$

где R_{tpr} – тепловое сопротивление теплопровода;

R_{rad} – тепловое сопротивление основания радиатора;

$$R_{reb, bar} = \alpha_{reb, bar} \cdot S_{reb}, \quad (13)$$

где S_{reb} – площадь боковой поверхности активной части ребер, м²;

$\alpha_{reb, bar}$ – коэффициент теплоотдачи на поверхности активной части ребра.

Коэффициент теплоотдачи определим, используя:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_1, \quad (14)$$

где Re – число Рейнольдса;

Nu – число Нуссельта;

Pr – число Прандля.

Величина поправочного коэффициента на входные условия $\varepsilon_1 = 1,5$ при теплообмене в предварительно турбулизированном потоке (за вентилятором, за турбулизирующей решеткой).

Предварительное моделирование тепловых и аэродинамических процессов позволит подобрать кулер с заданными параметрами. Представленная математическая модель может быть использована при проектировании устройств подобного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В.М. Черкасский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
2. Вихарев, А.А. Вентиляторы для радиоэлектронной промышленности / А.А. Вихарев // Современная электроника. – 2006. – № 5. – С. 32-38.
3. www.jmcproducts.com [электронный ресурс], Application of PWM speed control.pdf, 2008г., 7 стр
4. <http://www.freescale.com> [электронный ресурс], DRM088 Designer Reference Manual Devices Supported.pdf, 2008 г., 42 стр.

Демина Юлия Александровна

Орловский государственный технический университет г. Орел

Ассистент кафедры "Прикладная математика и информатика"

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел.: +7(4862)41-98-34

E-mail: pmii@ostu.ru

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, МОНИТОРИНГ

УДК 681.2.083

М.В. ЯКОВЕНКО, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ

МЕТОД И СРЕДСТВО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ УДАРНОГО ОБЪЕМА, СОВМЕСТИМЫЕ С ЭЛЕКТРОФИЗИОТЕРАПИЕЙ

Статья посвящена разработке метода контроля ударного объема, предназначенного для оценки текущего состояния сердечнососудистой системы и управления электрофизиотерапевтической техникой: представлено описание метода, его теоретическое обоснование, а также результаты экспериментального подтверждения его эффективности.

Ключевые слова: контроль, ударный объем, электрический ток, артериальное давление.

The article covers the development of stroke volume inspection method, intended for current cardio vascular system status appraisal and for electrophysiotherapeutic apparatus controlling. Offered method description, its theoretical justification and results of its efficiency experimental verification.

Key words: control, systolic volume, current, arteriotony.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Широкое распространение токовой физиотерапии обусловлено простотой технической реализации, локальностью воздействия и доказанными лечебными эффектами. В то же время, говорить о полном отсутствии воздействия на организм в целом, а также об отсутствии побочных эффектов от электрофизиотерапевтических процедур неправомерно. Известно, что неконтролируемое изменение состояния сердечнососудистой системы (ССС), сопутствующее токовым физиопроцедурам, может приводить к негативным последствиям, вплоть до летального исхода. При этом контроль состояния организма во время проведения таких процедур за исключением субъективной оценки пациентом своих ощущений в настоящее время не осуществляется. Принимая во внимание, что до 80 % населения нашей страны подвержены сердечнососудистым заболеваниям, становится очевидной высокая актуальность проблемы объективного контроля состояния ССС при проведении токовой физиотерапии. При этом целью такого контроля является получение достоверной информации о фактическом состоянии ССС и обеспечение условий для автоматического управления физиотерапевтической техникой.

На основе анализа результатов ранних исследований, проведенных различными учеными, включая авторов настоящей статьи, установлено, что в качестве интегрального комплексного параметра, обеспечивающего объективную оценку состояния ССС, целесообразно принять ударный объем крови (SV), а в качестве критерия принятия управляющего решения – величину возрастания SV при токовой нагрузке по отношению к значению SV_n при ее отсутствии. При этом специфика объекта и условий контроля выдвигает ряд требований к методу контроля: электросовместимость; безопасность; простота и низкая стоимость; малое время контроля; соответствие формата результата форме, требуемой для управления физиотерапевтической техникой.

Анализ существующих методов контроля ударного объема показал, что решить поставленную задачу при выполнении указанных требований известными методами невозможно – методы либо инвазивны, сложны, дороги, либо несовместимы с токовым воздействием на пациента. Поэтому была поставлена задача разработки объективного, простого и безопасного экспресс метода контроля ударного объема, совместимого с электрофизиотерапией.

В данном направлении на кафедре приборостроения, метрологии и сертификации ОрелГТУ проводятся работы на протяжении ряда лет. Результаты исследований обобщены в работах [1, 2], где описывается сущность предлагаемого экспресс метода контроля ударного объема. Однако, полученные после написания этих работ новые научные результаты позво-

лили существенно развить, дополнить и конкретизировать ряд аспектов предлагаемого метода. Рассмотрению итога этой работы и посвящена настоящая статья.

ПРИНЦИП КОНТРОЛЯ

С целью выявления принципов, которые возможно было бы использовать в качестве основы для разрабатываемого метода произведен анализ моделей ССС учитывающих возможности управления ударным объемом при воздействии электрического тока физиотерапевтического диапазона. Рассмотрены модели различных научных школ, в частности, МГТУ им. Н.Э. Баумана (В.Б. Парашин, Г.П. Иткин) [3]; СамГУ (А.П. Прошин) [4]; Universitet Tartuensis (В.А. Лищук, Е.В. Мосткова, J. Verdu) [5], Columbia University (D. Burkhoff, H. Suga) [6], основанные на принципах биомеханики кровообращения, гидродинамики, теории информационно-энергетического взаимодействия объектов и др. На основе анализа была выбрана наиболее приемлемая с учетом поставленной задачи модель, объясняющая изменение SV не только влиянием внутренних факторов, но и дающая возможность управления ударным объемом внешним, по отношению к организму, воздействием.

Данная модель ударного объема, описывающая его связи с внутренними и внешними регулирующими факторами, развита в направлении учета влияния параметров токового воздействия. Выражение для ударного объема, связывающее его с величиной токового воздействия имеет вид:

$$SV = \delta(V) \cdot k = k_0 \cdot \delta(V) + \delta(k_0) \cdot \delta(V) \cdot \sigma(i), \quad (1)$$

где $\delta(V)$ – зависимость ударного объема от значения конечного диастолического объема желудочка V ;

$k = k_0 + \delta(k_0) \cdot \sigma(i)$ – инотропный коэффициент;

k_0 – инотропное состояния желудочка;

$\delta(k_0)$ – зависимость инотропного коэффициента от значения инотропного состояния желудочка;

$\sigma(i)$ – функция влияния тока i на ударный объем.

Первое слагаемое определяет начальную величину ударного объема при отсутствии токового воздействия, а второе – определяет приращение ударного объема под токовой нагрузкой $\sigma(i)$.

Путем преобразования (1) с использованием уравнения Пуазейля получено выражение, позволяющее рассчитывать величину ударного объема через ряд параметров измерение которых возможно неэлектрическими методами:

$$SV = \frac{P_{S0} + 2P_{D0}}{3 \cdot HR_0 \cdot W_0} + \frac{\Delta P_S + 2P_D}{3 \cdot HR \cdot W} \sigma(i), \quad (2)$$

где P_S – давление систолическое;

P_D – давление диастолическое;

$\Delta P_S = P_S - P_{S0}$ – приращение давления систолического;

HR – частота сердечных сокращений;

W – периферическое сопротивление, которое может быть определено, например, по выражению В.Л. Карпмана [7]:

$$W = \frac{P_S - P_D}{Q} \cdot \left(1 + \frac{P_S \cdot t}{P_S + P_D} \right), \quad (3)$$

где t – отношение длительностей фаз сердечного цикла (коэффициент ритмичности);

Q – постоянный коэффициент выброса.

Полученная модель раскрывает сущность предлагаемого принципа контроля ударного объема, который заключается во взаимосвязи ударного объема с систолическим и диастолическим давлением, частотой и ритмичностью сердечных сокращений, а также с функцией влияния токового воздействия. Таким образом, измеряя значения P_S , P_D , HR и оценивая ритмичность при известном значении $\sigma(i)$, ударный объем предложено определять косвенно

ным методом из выражения (2) с учетом (3).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИИ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА УДАРНЫЙ ОБЪЕМ

В выражениях (2) и (3) все параметры являются либо известными, либо измеряемыми. Однако вид и параметры функции влияния тока $\sigma(i)$ неизвестны, поэтому для ее изучения проведены комплексные экспериментальные исследования, целью которых являлось установление параметров токового воздействия, оказывающих влияние на SV , и вида функции влияния этих параметров.

Исследования проводились с использованием экспериментального комплекса, описанного в [1]. Комплекс обеспечивает возможность мониторинга значений ударного объема при каждом сердечном сокращении с погрешностью не более ± 2 мл. В качестве генераторов токового воздействия использовались два аппарата: Амплипульс-7 и ДДТ-50-3. На указанной базе было проведено более 500 серий экспериментов при 5 родах тока с 4 вариантами временной модуляции на 7 частотах при 5 значениях глубины частотной модуляции на каждой частоте, на 20 пациентах разного возраста и пола.

Для установления существенности влияния различных параметров токового воздействия на SV был применен метод групповой корреляции, основанный на сравнении эмпирического корреляционного отношения h_{yx} с его случайным значением h_0 . Исследовалось влияние рода тока, частоты, глубины модуляции и амплитуды тока. На рисунке 1 (а, б, в) представлены примеры характерных диаграмм изменения средних значений SV и СКО (по 50 результатам измерений) от указанных параметров модуляции тока для различных значений его амплитуды, а также результаты проверки методом групповой корреляции существенности влияния указанных параметров на SV .

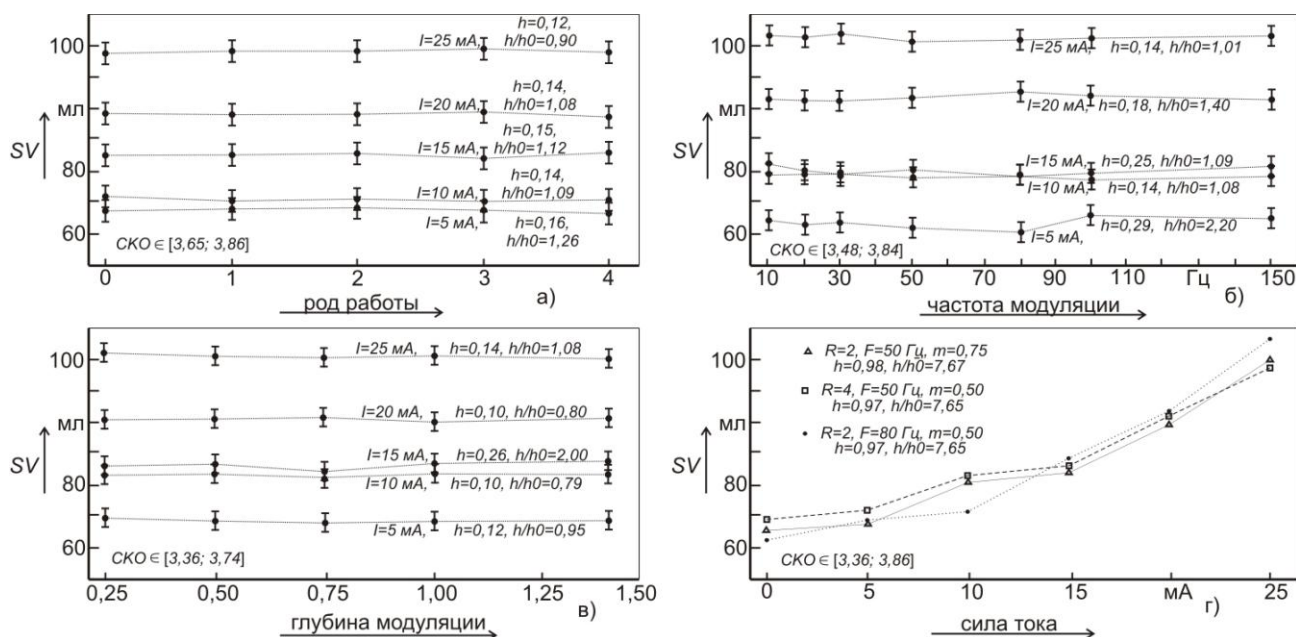


Рисунок 1 – Зависимости ударного объема от параметров тока

Статистический анализ показал, что SV практически не зависит от формы тока и параметров его модуляции при одинаковом амплитудном значении (коэффициент групповой корреляции при этом h_{yx} находится в диапазоне от 0,10 до 0,29, а отношение h_{yx}/h_0 – от 0,79 до 2,02, что в совокупности говорит об отсутствии или пренебрежимо малой значимости связи). В то же время было установлено (рисунок 1, г), что существенное влияние на SV оказывает амплитудное значение тока (коэффициент групповой корреляции h_{yx} в диапазоне от 0,97 до 0,99, а h_{yx}/h_0 – от 7,61 до 8,94). На основании этих результатов сделан вывод о том, что влиянием частотно-временных параметров тока при контроле SV можно пренебречь, а в качестве влияющего на SV параметра воздействия следует принять амплитуду тока i .

Следующей задачей экспериментальных исследований являлось изучение закона распределения вероятности значений ударного объема, измеренных при каждом сердечном сокращении при различных комбинациях временных и амплитудных параметров токового воздействия. Статистический анализ полученных результатов (на рисунке 2 представлены примеры характерных гистограмм), выполненный с использованием критериев χ^2 и Фишера, показал, что с доверительной вероятностью $P = 0,95$ закон распределения может быть принят нормальным, а серии результатов – равнодисперсными во всем диапазоне тока и для всех комбинаций частотно-временных параметров его модуляции.

Проведенная обработка результатов позволяет говорить о том, что параметры токового воздействия практически не влияют на характер закона распределения отдельных значений ударного объема SV_i , который остается нормальным. При этом амплитудное значение тока изменяет математическое ожидание SV и практически не влияет на дисперсию (значение СКО для исследованных 255 комбинаций параметров воздействия находится в пределах от 3,51 до 3,98 мл).

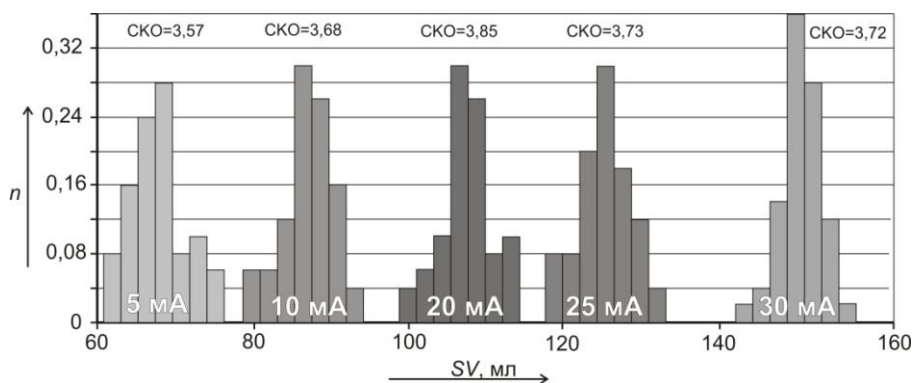


Рисунок 2 – Гистограммы распределения SV для разных значений сил тока при роде тока 2, частоте модуляции 30 Гц с глубиной 1

После определения влияющего параметра – амплитуды тока i , непосредственно исследовалась функция его влияния $\sigma(i)$ на ударный объем. Для установления общего вида $\sigma(i)$ она была выражена из формулы (2) при подстановке экспериментальных значений ударного объема и входящих в (2) и (3) прочих параметров. На рисунке 3 (а, б, в) представлены характерные примеры полученных таким образом средних значений $\sigma(i)$ и СКО для трех испытуемых различного возраста (соответственно, 25, 50 и 75 лет) при различных параметрах токового воздействия (каждое значение получено для 17 комбинаций параметров).

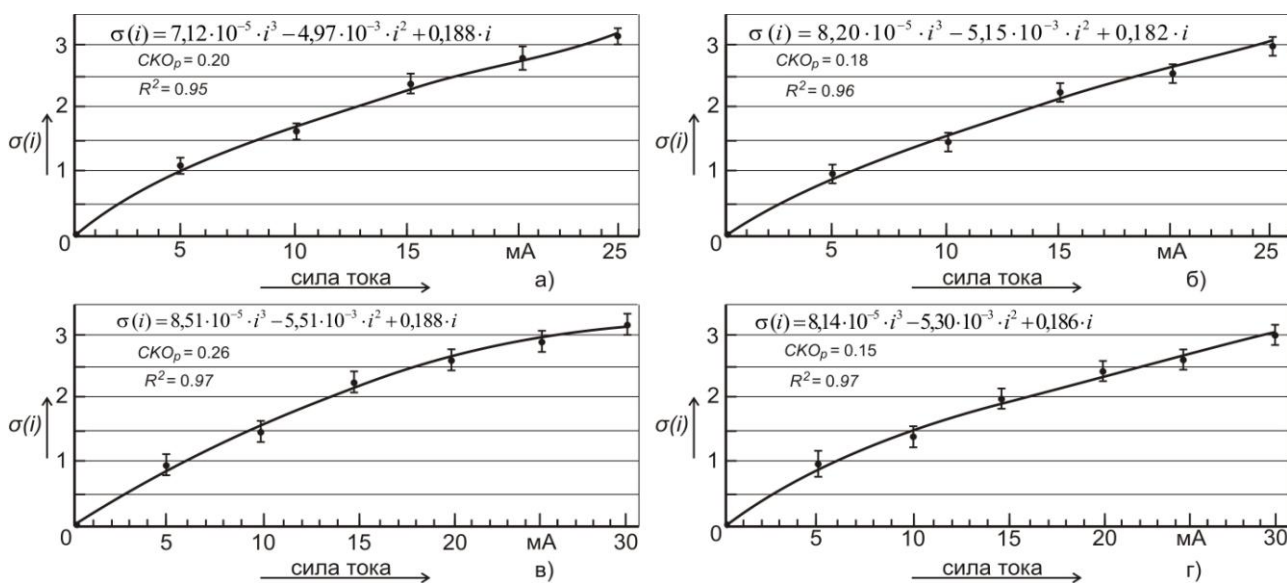


Рисунок 3 – Функция влияния тока на ударный объем

Проведенный статистический анализ экспериментальных данных указал на идентичность вида функции влияния y у различных объектов, для описания которой был предложен полином третьей степени с нулевым свободным членом (на графиках представлены уравнения регрессии, СКО регрессии и коэффициенты детерминации R^2).

На основании регрессионного анализа обобщенных по всей совокупности проведенных исследований данных (рисунок 3, г) получено выражение для усредненной функции влияния:

$$\sigma(i) = 8,14 \cdot 10^{-5} \cdot i^3 - 5,30 \cdot 10^{-3} \cdot i^2 + 0,186 \cdot i. \quad (4)$$

При этом коэффициент детерминации R^2 составил 0,97, а среднее квадратическое отклонение экспериментальных данных от уравнения регрессии – 0,15, что говорит о высокой адекватности регрессии. Методом групповой корреляции дополнительно доказана полнота регрессии.

АЛГОРИТМ И РЕЖИМЫ КОНТРОЛЯ

С использованием установленной функцией влияния тока на ударный объем (4) стало возможным вычисление ударного объема по формуле (2) с учетом (3) более точно, чем предлагалось ранее в [1]. В основу контроля SV на основании указанных выражений заложено определение параметров P_S , P_D , HR , t , поэтому необходимо выбрать методы их определения. На основе анализа существующих методов с учетом требований к разрабатываемому методу контроля SV в качестве наиболее приемлемого определен метод осциллометрической тонометрии, являющийся электросовместимым, безопасным и реализуемый с помощью сравнительно простых и дешевых автоматизированных и автоматических технических средств, и позволяющий комплексно измерять указанные параметры.

Предлагаемый модифицированный *алгоритм реализации метода*, включает два этапа.

Подготовительный этап проводится перед началом физиотерапевтической процедуры:

- методом тонометрии измеряют параметры P_{S0} , P_{D0} , HR_0 и определяют ритмичность сокращения сердца (коэффициент t_0);
- в соответствие с ритмом сердца вычисляют величину W_0 из выражения (3) для найденных P_{S0} , P_{D0} , HR_0 и t_0 ;
- рассчитывают начальное значение ударного объема SV_n из выражения (2), подставляя туда измеренные значения P_{S0} , P_{D0} , HR_0 и W_0 при значении $i = 0$;
- задают предельное значение множителя x_{max} , определяемое медицинскими требованиями.

Этап контроля включает следующие операции:

- проводят электрофизиотерапевтическую процедуру, при этом устанавливают заданное значение силы тока i ;
- по истечении интервала времени обеспечения установившегося режима $T_{уст}$ путем тонометрии измеряют параметры P_S , P_D , и HR и определяют ритмичность сокращения сердца (коэффициент t) за время измерения $T_{изм}$;
- вычисляют величину W из выражения (3) для найденных P_S , P_D , HR и t ;
- вычисляют приращение систолического давления ΔP_S : $\Delta P_S = P_S - P_{S0}$;
- рассчитывают значение ударного объема SV из выражений (2) с учетом (4), подставляя туда измеренные значения P_{S0} , P_{D0} , HR_0 , ΔP_S , P_D , и HR и установленное значение i ;
- определяют значение относительного приращения ударного объема $x = SV_j / SV_n$;
- сравнивают найденное значение x с допускаемым значением x_{max} на основании чего делают вывод о достижении или не достижении предельно допустимой границы ударного объема.

При использовании результатов контроля для управления средствами токового воздействия на основании результатов контроля предлагается формировать управляющее решение с последующим контролем SV : если $x < x_{max}$, то увеличить силу тока до следующего фиксированного значения, а при $x > x_{max}$ – уменьшить силу тока или прекратить его воздействие.

Для обеспечения функционирования представленного алгоритма необходимо обосновать режимы контроля SV , к числу которых относятся время обеспечения установившегося режима $T_{уст}$ и время измерения $T_{изм}$. В основу выбора заложены следующие положения: для наибольшей

эффективности контроля и своевременного принятия решения период контроля $T_k = T_{уст} + T_{изм}$ должен быть минимально возможным, при этом $T_{уст}$ должно быть достаточным для завершения переходных процессов в объекте контроля при изменении токового воздействия, а $T_{изм}$ – достаточным для измерения P_S , P_D , и HR и обеспечения требуемой точности определения SV .

Для выработки соответствующих рекомендаций по выбору $T_{уст}$ были проведены экспериментальные исследования динамических характеристик объекта контроля. В них исследовался отклик объекта на включение и отключение токового воздействия, а также на изменение значения тока (на рисунке 4 представлены характерные примеры полученных переходных зависимостей). На основе статистического анализа

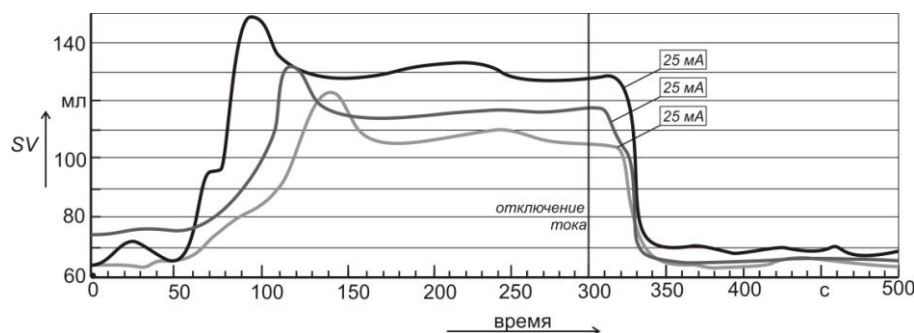


Рисунок 4 – Зависимость SV от времени косвенного воздействия током при: $R = 2$, $F = 50$ Гц, $m = 0,5$

результатов было установлено, что $T_{уст}$ находится в зависимости от значения изменения токового воздействия Δi и определяется в интервале от 20 до 150 с при изменении тока, соответственно, от 50 до 5 мА. На основе регрессионного анализа получе-

но условие выбора $T_{уст}$: $T_{уст} \geq 152 - e^{0,124\Delta i + 0,034}$ при $\Delta i \in [0;30]$ мА и $T_{уст} = e^{-0,071\Delta i + 6,841}$ при $\Delta i \in (30;100]$ мА.

Предложенным методом контролируется среднее значение SV за время изменения $T_{изм}$, которое определяется, прежде всего, временем измерения параметров P_S , P_D , и HR выбранным тонометром – T_t (для современного среднескоростного тонометра на одно измерение необходимо не менее 15 с). Поэтому первым условием выбора $T_{изм}$ является: $T_{изм} \geq T_t$. С учетом нормального закона распределения отдельных значений SV_i при каждом сердечном сокращении с установленным выше значением СКО вторым условием выбора $T_{изм}$ может быть условие увеличения точности определения SV за счет усреднения SV_i : $T_{изм} \geq (СКО/СКО_{треб})^2 / HR$, где $СКО_{треб}$ – требуемое значение СКО.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДА КОНТРОЛЯ

Следующим этапом исследований являлся метрологический анализ, необходимый для нормирования точности предлагаемого метода. К числу учитываемых основных состоящих погрешности определения SV отнесены: инструментальная погрешность тонометра при измерении P_S , P_D , и HR , методические погрешности, погрешность установки силы тока. Установлено, что суммарная расчетная погрешность не превышает ± 11 %.

Для экспериментального определения погрешности предложенного метода контроля проведены сравнительные исследования результатов измерения ударного объема предложенным и образцовым эхотомоскопическим методом для каждого из трех испытуемых разного возраста при 7 значениях тока в диапазоне от 0 до 30 мА и 17 комбинациях параметров его модуляции. Параметры P_S , P_D , и HR определялись автоматическим тонометром типа AND UA-778 (предельная погрешность 3 мм.рт.ст. при измерении P_S и P_D , и 5% при измерении HR для времени автоматического контроля не более 15 с).

Анализ результатов подтвердил работоспособность предложенного метода при хороших метрологических характеристиках: предельные отклонения SV не превышают 15 мл при систематической погрешности менее 2,3 мл и среднем квадратическом отклонении менее 8,0 мл (рисунок 5, а). Результат контроля относительного приращения ударного объема SV_j / SV_n характеризуется предельным отклонением 12 % при систематической погрешности менее 2,7 % и среднем квадратическом отклонении менее – 6,5 % (рисунок 5, б).

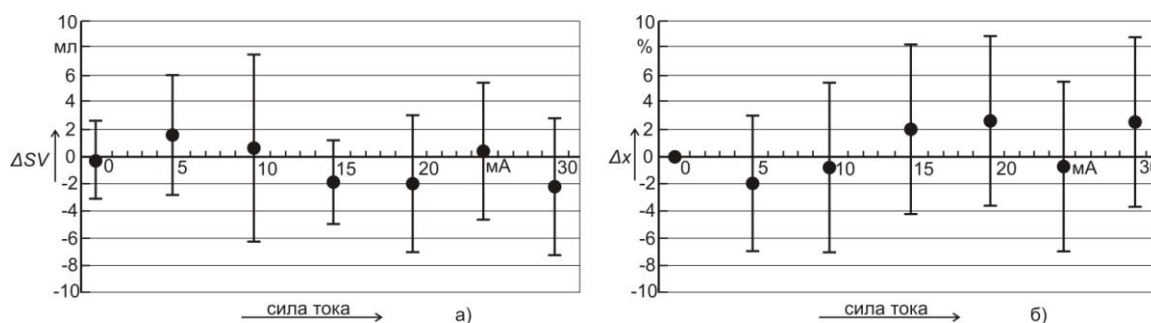


Рисунок 5 – Экспериментальная проверка результатов контроля

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

Согласно изложенному алгоритму средство контроля ударного объема строится на модульном принципе с использованием в качестве базовых измерительных цепей функциональных блоков тонометров (структурная схема средства представлена на рисунке 6, а алгоритм его работы на рисунке 7).

Управление измерением P_s , P_D и HR осуществляется устройством управления 7, которое непосредственно связано с управляющим контроллером 2 блока тонометра 1, подает через него команду запуска преобразования и получает от устройства ввода 11 (например, клавиатура) значения

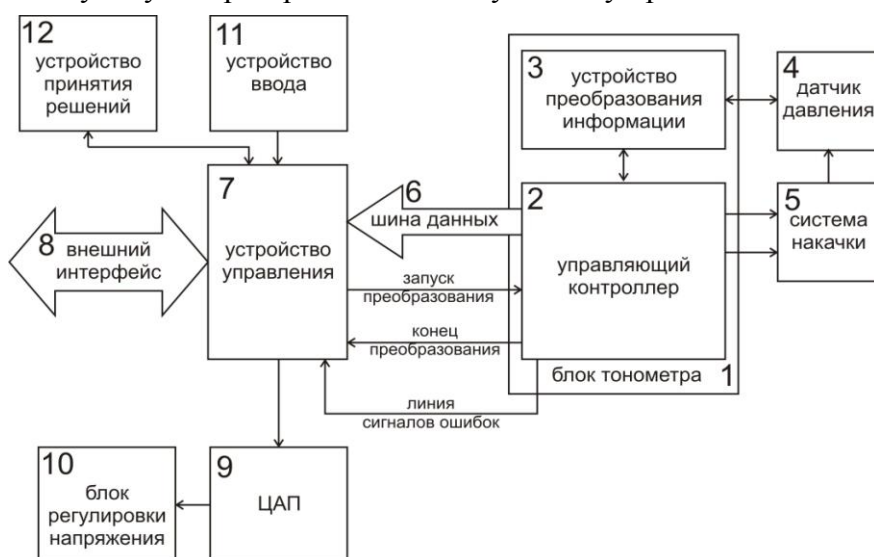


Рисунок 6 – Структурная схема средства контроля ударного объема

i и x_{max} . Управляющий контроллер 2 в соответствии с осциллометрической методикой измерения давления управляет системой накачки 5, которая создает давление, преобразуемое датчиком давления 4 в электрический сигнал. Этот сигнал, поступает на устройство преобразования информации 3, которое выделяет из него численные значения P_s , P_D , HR и признака аритмии a и передает эту информацию управляющему контроллеру 2. Признак конца преобразования в виде одиночного импульса

передается с блока 2 на блок 7 по соответствующей линии, что свидетельствует о выставлении данных с блока тонометрии на шину данных 6. Сработав по прерыванию от импульса, устройство управления 7 считывает данные P_s , P_D , HR , и a . На основании полученных численных значений параметров устройство управления 7 посредством блока принятия решений 12 определяет t , а затем последовательно рассчитывает значения периферического сопротивления W , ударного объема SV и коэффициента x . Полученное значение x сравнивается с предельным x_{max} , на основании чего формируется результат контроля в соответствии с представленным алгоритмом.

Результаты контроля, включая численные значения SV и промежуточных параметров, выводятся через внешний интерфейс 8 (параллельный интерфейс, типа LPT, или стандартизованный последовательный, например SPI, TWI, RS-485).

В аспекте разработки устройства контроля ударного объема для управления средством токового воздействия по результату контроля устройством управления 7 принимается управляющее решение (увеличить ток, уменьшить ток), которое через внешний интерфейс 8 передается к функциональной части управляемого объекта (интерфейс и протокол передачи данных определяются требованиями этого объекта).

В случае управления аналоговым сигналом управляющий код ЦАП 9 преобразует в напряжение, которое блоком регуляции выходного напряжения 10 приводится по уровню к требуемому для управляемого аппарата значению.

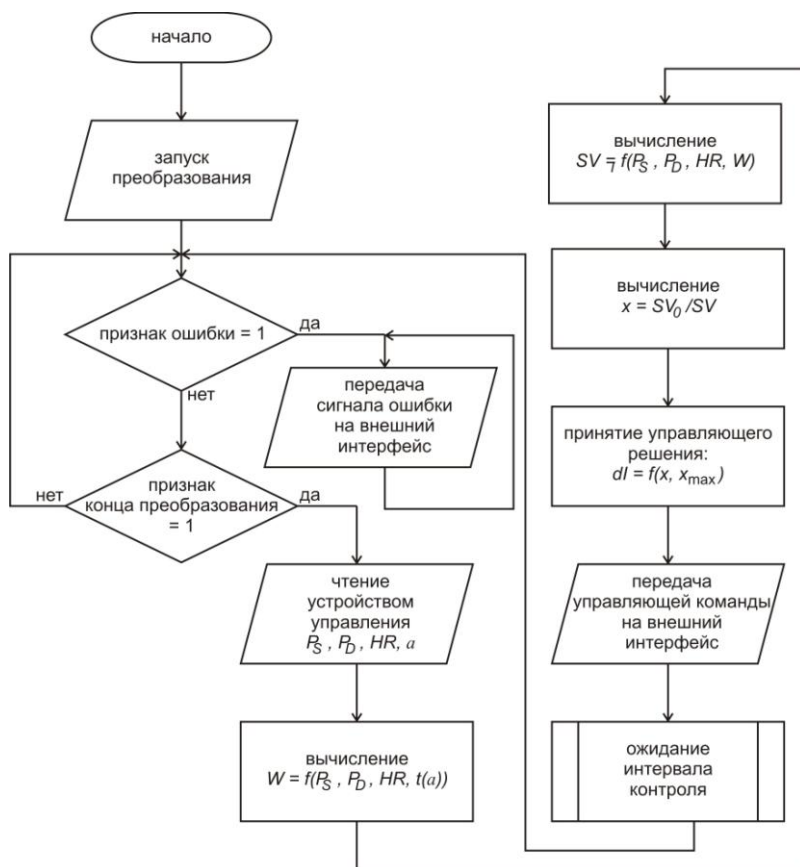


Рисунок 7 – Алгоритм работы средства контроля ударного объема

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

- в модели ударного объема учтено частное влияние внешнего воздействующего электрического тока, определен влияющий параметр – амплитуда тока;
- исследована и формализована функция влияния амплитуды тока на ударный объем, с учетом которой разработан неинвазивный экспресс метод контроля ударного объема, совместимый с токовым воздействием, позволяющий получать информацию о текущем (квазимгновенном) состоянии сердечно-сосудистой системы в форме, пригодной для использования в контурах адаптивного управления физиоаппаратами;

– проведен анализ точности и экспериментально подтверждена работоспособность и эффективность разработанных методов контроля ударного объема;

– предложены принципы построения и алгоритм работы средства контроля ударного объема, реализующего предложенный метод и соответствующего сформулированным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подмастерьев, К.В. Метод контроля ударного объема для систем управления электрофизиотерапевтической техникой [Текст] / К.В. Подмастерьев, Б.А. Егоров, М.В. Яковенко // Контроль. Диагностика, 2009. – № 7.
2. Подмастерьев, К.В. Устройство контроля ударного объема сердца для электрофизиоаппаратуры [Текст] / К.В. Подмастерьев, Б.А. Егоров, М.В. Яковенко // Медицинская техника, 2010. – № 1.
3. Парашин, В.Б. Биомеханика кровообращения [Текст] / В.Б. Парашин, Г.П. Иткин // под ред. В.С. Щукина – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
4. Прошин, А.П. Математическое моделирование системы кровообращения и его практические применения / А.П. Прошин, Ю.В. Солодяников // Автоматика и телемеханика, Т. 67, 2006.
5. Ведру, Ю.В. Математическая модель сердечно-сосудистой системы для прикладных имитационных задач физиологии и медицины. Acta et Comm. Universitet Tartuensis. – 1998. – № 800.
6. Burkhoff D. Cardiac Energetics: From EMAX to Pressure-Volume Area. / D. Burkhoff, H. Suga // Clin Exp Pharmacology and Physiology. – 2003. – № 30.
7. Карпман, В.Л. Эластическое сопротивление артериальной системы у спортсменов [Текст] / В.Л. Карпман, В.Р. Орел, Н.Г. Кочина, С.С. Никитина, Б.Г. Любина // Сб.: Клинико-физиологические характеристики сердечно-сосудистой системы у спортсменов. – М.: РГАФК, 1994.

Яковенко Михаил Викторович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Старший преподаватель кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
 Тел. (4862)419876
 e-mail: lenolium@yandex.ru

Подмастерьев Константин Валентинович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»
 Тел. (4862)419876
 e-mail: asms-orel@mail.ru

Е.В. ПАХОЛКИН, Н.Н. ФОКИН

АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДА КОНТРОЛЯ ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ЭЛЕКТРОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Приводится анализ достоверности метода контроля вязкостно-температурных свойств моторных масел электропараметрическим методом. Рассмотрены основные факторы, снижающие точность метода. Приведен пример расчета вероятности принятия решения о состоянии масла.

Ключевые слова: метрологический анализ, точность, контроль, вязкостно-температурные характеристики, моторное масло.

The analysis of reliability of a quality monitoring of viscosity-temperature properties of engine oils is resulted by an electroparametrical method. The major factors reducing accuracy of a method are considered. The example of calculation of probability of decision-making on an oil condition is resulted.

Key words: the metrological analysis, accuracy, control, viscosity-temperature properties, engine oil.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ существующих методов контроля моторных масел (ММ) [1-5] показал, что, не смотря на широкий перечень эксплуатационных свойств ММ, в качестве эффективных диагностических признаков и параметров выступает ограниченный перечень свойств, а большинство нормируемых показателей оценивается только в рамках контроля новой продукции, при этом они мало пригодны для реализации контроля ММ в процессе эксплуатации.

К числу важнейших свойств ММ относятся вязкостно-температурные свойства, определяющие зависимость вязкости масла от температуры. В [6] описан метод контроля вязкостно-температурных свойств ММ путем создания для исследуемой пробы ММ условий фрикционного взаимодействия в испытательном трибосопряжении. Оценка свойств ММ производится с использованием электрического диагностического параметра «нормированное интегральное время разрушения смазочного слоя» (НИВ), характеризующего состояние смазки в зонах трения работающего трибосопряжения.

Алгоритм контроля ММ подробно описан в работе [6]. Он включает следующие действия:

- проба материала заданного объема помещается в испытательное трибосопряжение, в качестве которого используется тестовый подшипник качения;
- производится технологическая обкатка подшипника с исследуемым смазочным материалом при заданных режимах (частоты вращения колец, характер и величина нагружения) и условиях (температура Θ_1) в течение заданного времени;
- регистрируется значение характеризующего вероятность микроконтактирования в подшипнике диагностического параметра НИВ – K_1 , соответствующее установившемуся режиму;
- по окончании периода обкатки производится искусственный нагрев трибосопряжения с исследуемой пробой до температуры Θ_2 ;
- регистрируется максимальное значение диагностического параметра НИВ – K_2 , соответствующее температуре Θ_2 ;
- определяется приращение диагностического параметра $\Delta K = K_2 - K_1$, как следствие теплового воздействия на моторное масло;
- приращение диагностического параметра ΔK сравнивается с ранее полученным по данному алгоритму приращением параметра $\Delta K_{\text{этал}}$ для эталонной пробы масла, индекс вязкости которого известен.
- по результатам сравнения приращений диагностического параметра для двух проб делается вывод о пригодности испытуемого ММ к дальнейшей эксплуатации.

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА.

В соответствии с методом ММ следует признать годным, если:

$$K_{\partial k} \leq K_{\bar{\partial} k} , \quad (1)$$

где $K_{\partial k}$ – полученное в результате теплового воздействия значение параметра НИВ для испытуемой пробы ММ;

$K_{\bar{\partial} k}$ – полученное в результате теплового воздействия значение параметра НИВ для эталонной пробы ММ.

К факторам, влияющим на точность метода, относятся следующие.

Во-первых, оценка вероятности разрушения смазочного слоя, оцениваемая по параметру НИВ, реализуется с аппаратной погрешностью, характерной для средств измерения интервалов времени. Во-вторых, результат измерения параметра НИВ содержит случайную погрешность, являющуюся результатом действия большого количества факторов. Выполненный авторами анализ закона распределения вероятности результатов измерения параметра НИВ для установившегося режима работы подшипника показал, что результаты распределены по нормальному закону. Таким образом, с учетом свойств нормального распределения теоретически при любых полученных $K_{\partial k}$ и $K_{\bar{\partial} k}$ возможны ситуации неверного принятия решения, например, когда (как показано на рисунке 1) ММ ошибочно может быть признано годным:

$$\begin{cases} K_{\partial k} \leq K_{\bar{\partial} k} \\ K_{\partial ki} > K_{\bar{\partial} ki} \end{cases} , \quad (2)$$

где $K_{\partial ki}$ – возможная в вероятностном смысле реализация значения параметра НИВ для пробы контролируемого ММ;

$K_{\bar{\partial} ki}$ – возможная в вероятностном смысле реализация значения параметра НИВ для пробы эталонного ММ.

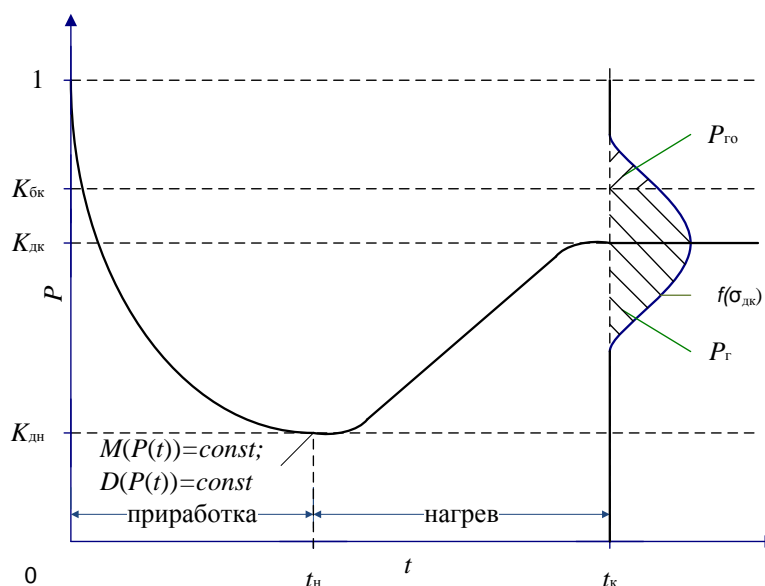


Рисунок 1 – Вероятности принятия решения о состоянии ММ:

$P_г$ – вероятность признания ММ годным; $P_{го}$ – вероятность того, что моторное масло признано годным ошибочно;

$\sigma_{\partial k}$ – среднее квадратическое отклонение при измерении НИВ;

$f(\sigma_{\partial k})$ – функция, характеризующая распределение результатов измерения НИВ;

$K_{дн}$ – значение параметра НИВ, установившееся к концу приработки подшипника (на момент начала теплового воздействия), характеризующееся постоянством математического ожидания $M(P(t))$ и дисперсии $D(P(t))$ вероятности разрушения смазочного слоя

На рисунке 2 представлены графики, описывающие аппаратную погрешность измерения (нижний график) и экспериментальную зависимость среднего квадратического отклонения параметра НИВ (верхний график), установленную для выбранного типа подшипника и условий реализации метода контроля ММ. Обе зависимости определяются уровнем измеряемого диагностического параметра НИВ.

Анализируя рисунок 2, можно сделать вывод, о том, что аппаратная погрешность, которая является систематической, существенно меньше случайной составляющей погрешности, то есть ее можно не рассматривать.

Рассмотрим на примере определение достоверности принятия решения при контроле ММ по критерию вязкостно-температурных свойств. При сборе диагностической информации получены экспериментальные данные, показанные на рисунке 3. Значение диагностического параметра НИВ до искусственного нагрева трибосопряжения с исследуемой пробой – $K_{нк} = 5,6 \cdot 10^{-4}$, после нагрева – $K_{ок} = 7 \cdot 10^{-2}$.

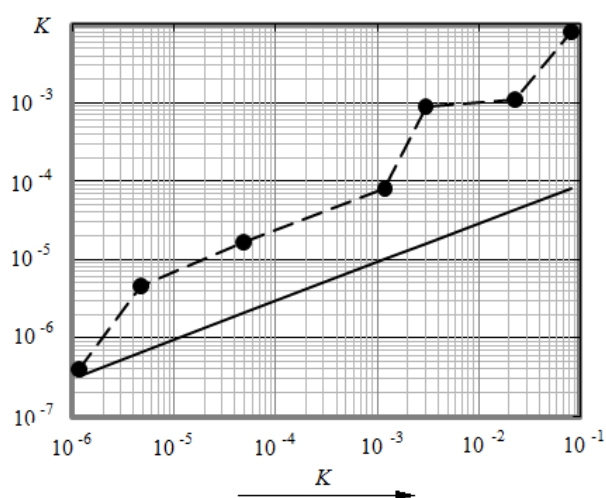


Рисунок 2 – Зависимости среднего квадратического отклонения и методической погрешности измерения НИВ

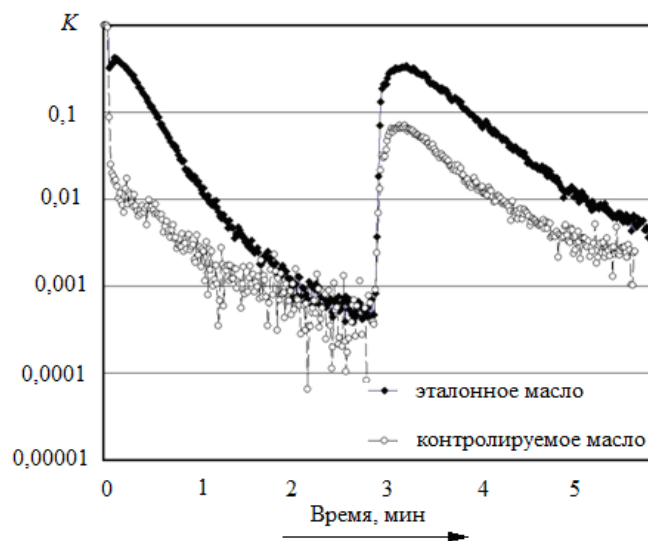


Рисунок 3 – Полученные зависимости при реализации алгоритма контроля

Значение параметра НИВ, измеренное после нагрева трибосопряжения с пробой эталонного масла $K_{бк} = 3 \cdot 10^{-1}$.

Как показано на рисунке 1, вероятность того, что моторное масло годное:

$$P_T = \int_0^{K_{бк}} f(\sigma_{дк}) dx. \quad (3)$$

При значении диагностического параметра $K_{дк} = 7 \cdot 10^{-2}$ значение среднего квадратического отклонения составляет $\sigma_{дк} = 8 \cdot 10^{-3}$. Подставляя значения параметров в (3), можно определить, что вероятность принятия решения о годности ММ стремится к 100 % ($P_T = 100\%$). Данное значение обусловлено тем, что при значениях $K_{дк}$ и $K_{бк}$, отличающихся почти на порядок, и малых значениях среднего квадратического отклонения параметра НИВ, интеграл (3) равен $P_T = 1$ (данное значение получено в среде MathCAD с допуском сходимости $TOL = 10^{-10}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При оценке вероятности принятия решения о годности ММ значением инструментальной погрешности измерения параметра НИВ можно пренебречь, так как оно на порядок меньше степени рассеяния результатов, определяемой совокупностью случайных влияющих факторов. Экспериментальное подтверждение нормальности закона распределения вероятности результатов измерения параметра НИВ позволяет использовать интегральную функцию нормированного нормального распределения для оценки вероятности принятия решения о состоянии контролируемого масла. Достоверность метода определяется степенью рассеяния диагностического параметра, которая более, чем на порядок меньше среднего значения.

Работа выполняется при поддержке аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)”, код проекта 2.1.2/2075.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов [Текст] / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. – 268 с.
- 2 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.
- 3 Проблема подделок моторных масел [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lto.h1.ru>.
- 4 Колчин, А.В. Оперативная проверка качества и сортности топлива и масла [Электронный ресурс] / А.В. Колчин // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 2004. – № 4. – Режим доступа: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20040437.htm>.
- 5 Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах: Учеб. для вузов [Текст] / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Мн.: Выш. шк., 1999. – 374 с.
- 6 Подмастерьев, К.В. Электрический контроль вязкостно-температурных свойств моторных масел: теоретическое обоснование, алгоритм, программно-аппаратные свойства [Текст] / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, Н.Н. Фокин // Контроль. Диагностика. – №7 (133). – 2009.

Пахолкин Евгений Васильевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 416684
E-mail: Eugene_P@bk.ru

Фокин Николай Николаевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Ассистент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 416761
E-mail: alphabet2004@mail.ru

С.Н.СЫЧЕВ, В.А.ГАВРИЛИНА, Е.С.СЫЧЕВА

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОКОЛОНОЧНОГО ЖИДКОСТНОГО ХРОМАТОГРАФА «МИЛИХРОМ-6»

Рассмотрены особенности использования микроколоночного жидкостного хроматографа «Милихром-6» в условиях, предусматривающих быструю смену хроматографических систем и как базового аппарата для анализатора подлинности вин. Показано, что в сочетании с использованием так называемых «универсальных элюентов» [1,2,3], время подбора хроматографических условий может составлять 1 – 2 рабочих дня, а перестройка хроматографа с одной системы на другую - 0,5 часа при достойной эффективности и воспроизводимости хроматограмм в режиме ступенчатого градиентного элюирования.

Ключевые слова: хроматограф, ступенчатое градиентное элюирование.

Features of use semi-mikro-column liquid chromatograph "Milihrom-6" in the conditions providing fast change chromatographic systems and as the base device for the analyzer of authenticity of wines are considered. It is shown, that in a combination to use so-called «universal eluents» [1,2,3], selection time chromatographic conditions can make 1 – 2 working days, and reorganisation of chromatograph from one system at other - 0,5 o'clock at worthy efficiency and reproducibility results in a mode step-to-step eluation.

Key words: chromatograph, mode step-to-step eluation.

ВВЕДЕНИЕ

Прошло более 20 лет с начала выпуска хроматографа «Милихром», разработанного сотрудниками СО АН СССР (г. Новосибирск) [4,5], на орловском заводе «Научприбор». За это время хроматограф, казалось бы, не претерпел уж слишком существенных для химика-аналитика изменений: в жидкостную систему добавлен еще один шприцевой насос, хроматографическая колонка 80x2 (наиболее распространенные размеры) помещена в контактный термостат на 35°C, хроматограф укомплектован стандартным программным обеспечением «UniChrom». Попытки ввести в комплект хроматографа динамический смеситель (как, например, в современном новосибирском аналоге «Милихроме» – хроматографе А-02) на сегодняшний день закончились неудачей. Тем не менее, приведенные изменения в конструкции в сочетании с давно не используемым методом ступенчатого градиентного элюирования, особенностями программного обеспечения «UniChrom» и использованием универсальных элюентов [1,2,3], при правильном использовании дают потрясающий эффект и делают хроматограф «Милихром-6» настоящей «рабочей лошадкой» хроматографии, способной решать в том числе и ряд уникальных задач, не решаемых с помощью значительно более современных отечественных и зарубежных приборов.

СТУПЕНЧАТОЕ ГРАДИЕНТНОЕ ЭЛЮИРОВАНИЕ

Технический прием, называемый ступенчатым градиентным элюированием, предложен и реализован еще на однонасосном варианте хроматографа «Милихром» Г.И. Барамом [4,5]. В двухнасосном варианте ступенчатый градиент можно реализовать только на хроматографе «Милихром-6» в обращенно-фазовом варианте высокоэффективной жидкостной хроматографии (ОФ ВЭЖХ) с применением универсальных элюентов [1,2,3] (рисунок 1).

Алгоритм выполнения ступенчатого градиента для анализа соединений, растворимых в воде, водно-солевых подкисленных или подщелоченных растворах, водно-спиртовых и водно-ацетонитрильных растворах вне зависимости от класса соединений следующий:

1. Из расчета на работу в течение недели готовится буфер «А»: к 100 см³ водного 0,02 М раствора КН₂РO₄ прибавляется 0,5 см³ диэтиламина и 1,5 см³ ортофосфорной кислоты [1,2,3];
2. Готовятся восемь (максимально возможное для хроматографа «Милихром-6» количество ступеней градиента: по четыре ступени для каждого насоса) элюентов для ступенчатого градиента (таблица 1);

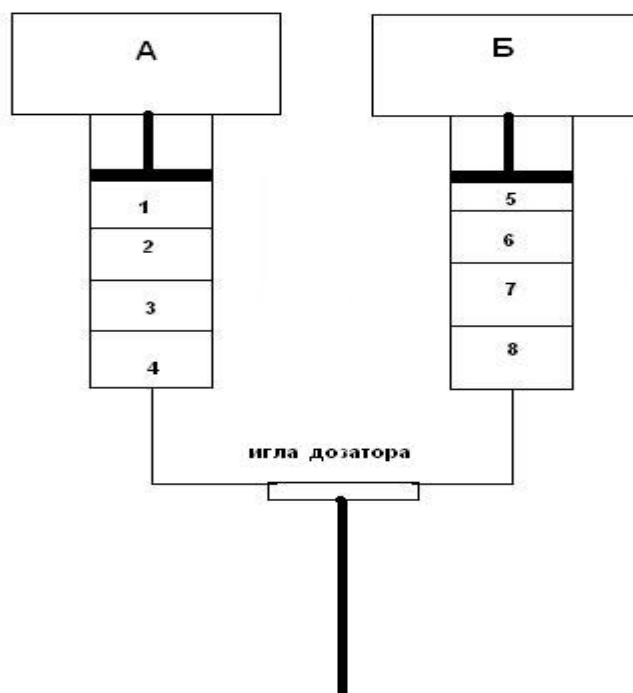


Рисунок 1 – Жидкостная система хроматографа «Милихрома-6», изготовленная для работы в режиме ступенчатого градиента в обращено-фазовом режиме высокoeffективной жидкостной хроматографии А и Б - перевернутые шприцевые насосы, 1...8 – номера элюентов с разным содержанием модификатора

3. По программе, набранной с компьютера, в нужных объемах в перевернутые насосы набираются ступени градиента. Сначала заполняется насос А в последовательности: элюент № 4, элюент № 3, элюент № 2 и элюент № 1; затем заполняется насос «Б»: элюент № 8, элюент № 7, элюент № 6, элюент № 5. При хроматографировании последовательность подачи элюента в колонку следующая: элюенты № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6, № 7, № 8. Элюентом № 1 осуществляется регенерация колонки перед каждым последующим анализом (объем регенерации от 400 до 600 мм³).

Таблица 1 – Состав ступеней элюента

№ элюента	Объемные соотношения буфера «А» и ацетонитрила, части	
	Буфер «А»	Ацетонитрил
1	100	0
2	95	5
3	90	10
4	85	15
5	80	20
6	70	30
7	60	40
8	50	50

Смысл переворачивания насосов следующий: так как плотность ацетонитрила меньше плотности воды, то элюент № 4 легче, чем элюент № 3; элюент № 3 легче, чем элюент № 2; элюент № 2 легче, чем элюент № 1. Таким образом, ступени градиента, набранные под шток насоса в порядке уменьшения плотности, весьма устойчивы и не перемешиваются [4].

Введение второго насоса привело к резкому улучшению разрешения хроматографической системы в градиентном режиме элюирования. В качестве примера можно привести

хроматограммы красного сухого вина «Каберне», полученные при использовании ступенчатого градиента. На рисунке 2А показана хроматограмма, полученная на однонасосном варианте хроматографа «Милихром», а на рисунке 2Б – хроматограмма, полученная на двухнасосном варианте. Учитывая, что использовалась одна и та же колонка и элюент (ступенчатый градиент ацетонитрила в буфере «А» – таблица 1), следует признать, что эффект получился сильным. Действительно, на хроматограмме 2Б хроматографических пиков почти в два раза больше, чем на хроматограмме 2А. Необходимо отметить, что такое разрешение получается не всегда: наилучшие результаты дает близкая к линейной, своеобразная S – образная форма градиента (таблица 2, рисунок 3).

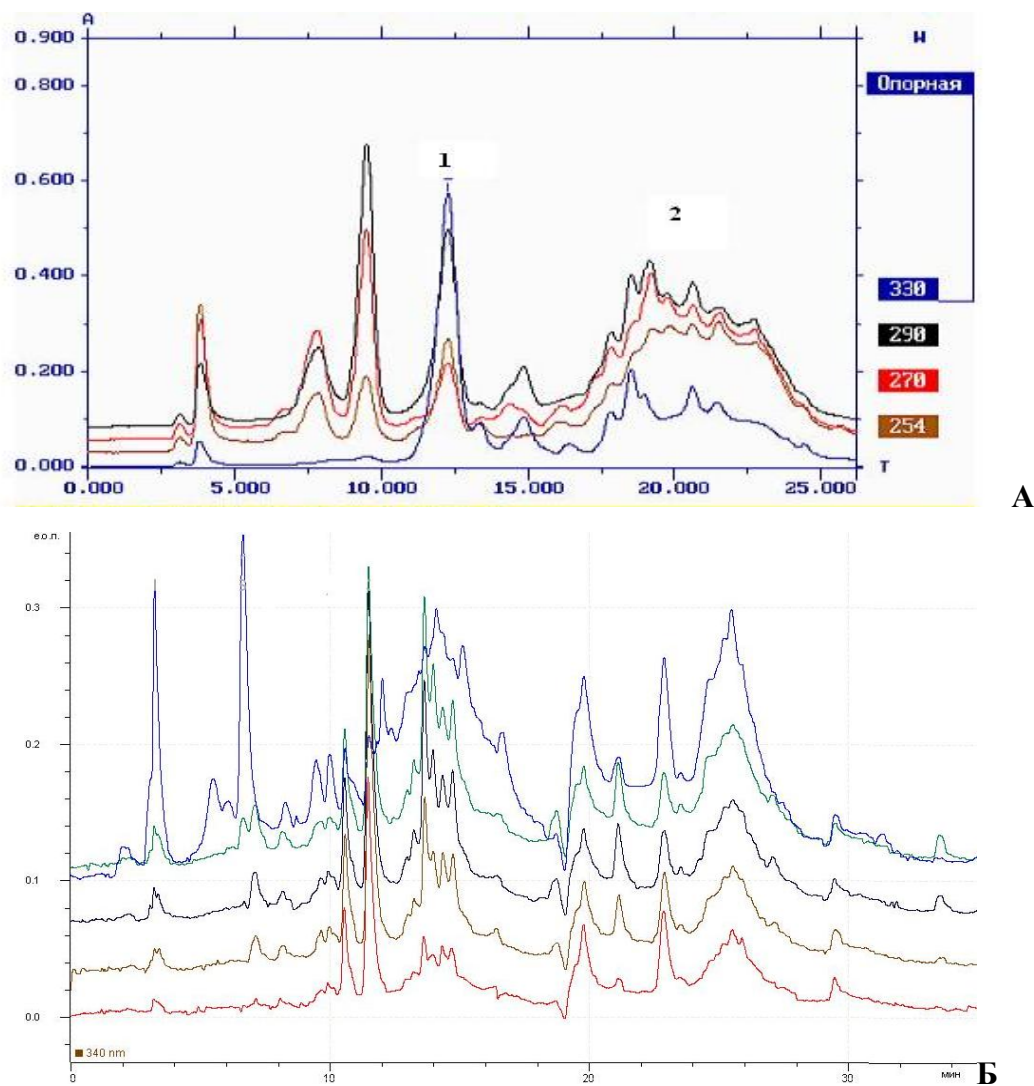


Рисунок 2 – Хроматограмма вина «Каберне»
 А – однонасосный вариант хроматографа «Милихром-5-3»,
 Б – двухнасосный вариант хроматографа «Милихром – 6»
 Колонка 80x2 заполнена Сепароном С18 (5 мкм), расход элюента 120 мм³/мин.

Таблица 2 – Профиль ступенчатого градиента к хроматограмме рисунка 2Б

№ элюента по таблице 1	1	2	3	4	5	6	7	8
Объем элюента в ступени градиента, мм ³	780	440	500	700	700	650	550	550
Примечание. Регенерация 400 мм ³ элюентом № 1.								

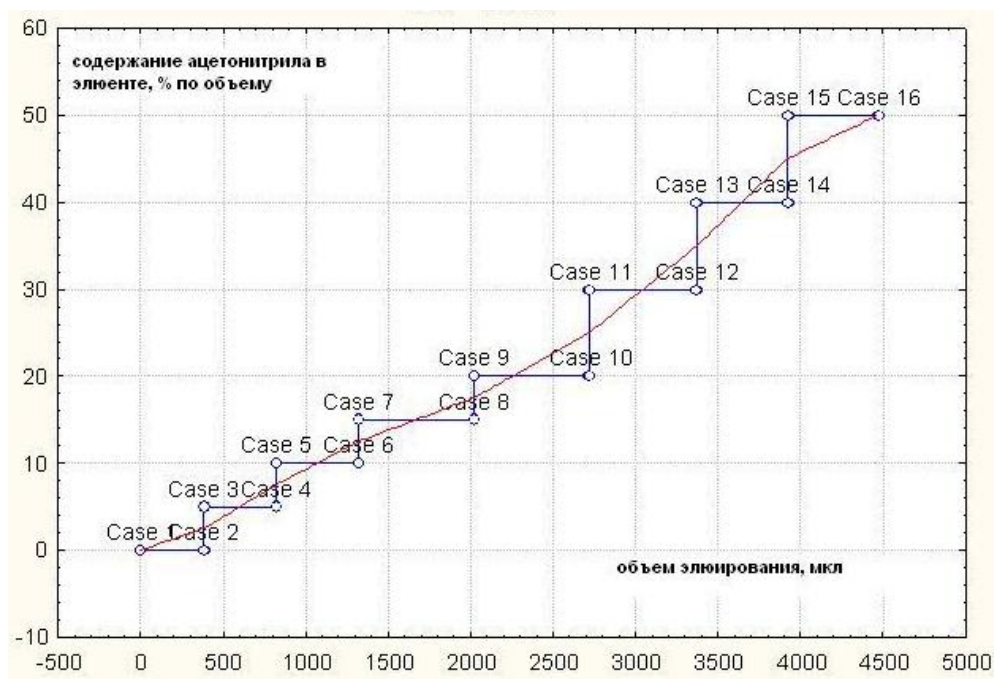


Рисунок 3 – Профиль ступенчатого градиента к хроматограмме рисунке 2Б

В представленном режиме могут быть разделены и проанализированы разные растительные экстракты [6, 7], лекарственные препараты и их смеси (рисунок 4) и т.д.. Время подбора хроматографической системы и условий детектирования в этих случаях не превышает 4 – 8 часов, так как в основном вся работа сводится к уточнению объемов ступеней ступенчатого градиентного элюирования и длин волн при многоволновом спектрофотометрическом детектировании.

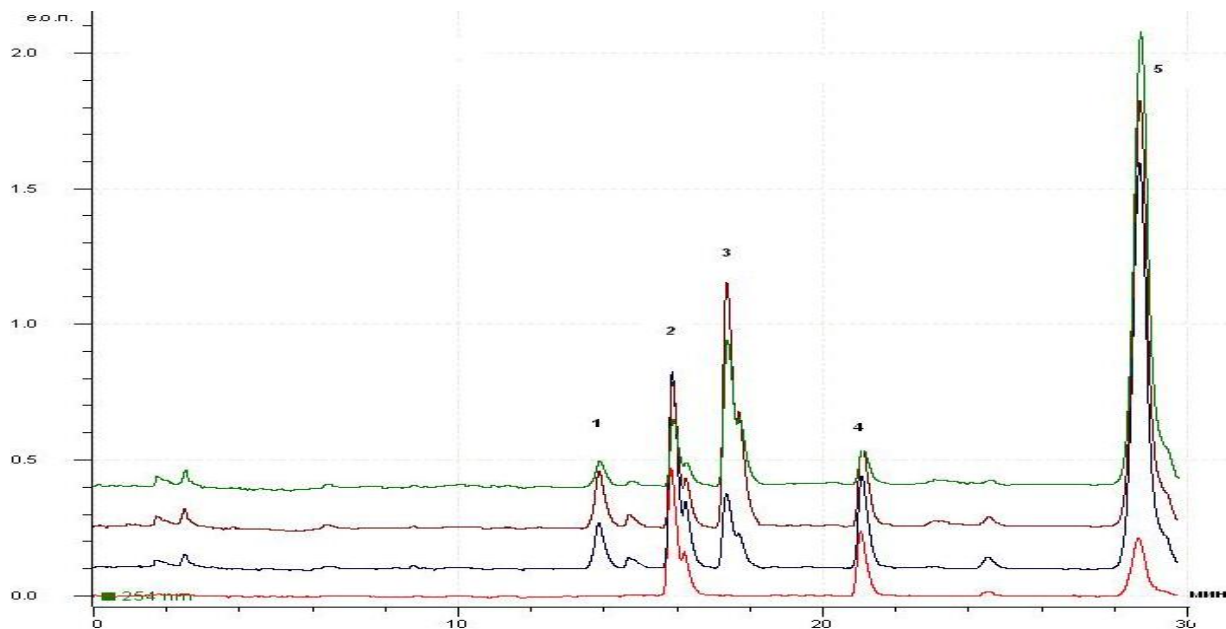


Рисунок 4 – Хроматограмма лекарственных соединений

1 – иохимбин, 2 – торасемид, 3 – бисакодил, 4 – варфарин, 5 – тетурам
Колонка 80x2 заполнена Сепароном С18.

Элюент: ступенчатый градиент от 5 до 60% ацетонитрила в буфере «А».

Зеленая линия – 254 нм, коричневая линия – 270 нм,
черная линия – 290 нм, красная линия – 320 нм.

Расход 120 мкл/мин, объем пробы – 6 мкл, температура колонки – 35°С.

Относительное среднее квадратическое отклонение времен удерживания хроматографических пиков при использовании режимов по таблице 2 составляет 1.5 %.

Достаточно серьезная перестройка хроматографа с обращено-фазового режима ВЭЖХ (ОФ ВЭЖХ) на нормально-фазовый режим (НФ ВЭЖХ), включая процесс перестройки хроматографа, выведения хроматографической колонки на достаточно стабильный режим работы (имеется в виду вариант НФ ВЭЖХ) и хроматографирования, занимает не больше 15 – 20 мин.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХРОМАТОГРАФА «МИЛИХРОМ-6» КАК БАЗОВОГО АППАРАТА ДЛЯ АНАЛИЗАТОРА ПОДЛИННОСТИ ВИН

«Милихром-6» был выбран базовым аппаратом для анализатора подлинности вин [8, 9] по двум причинам:

- хорошая воспроизводимость градиентного элюирования;
- прямой доступ к кодам оптических плотностей элюата.

Хорошая воспроизводимость градиентного элюирования позволяет использовать метод главных компонент в анализаторе подлинности вин при небольших изменениях хроматографической системы. Так, факторы, полученные из кодов оптических плотностей элюата при использовании хроматографической колонки, заполненной Сепароном С18, хорошо коррелируют (коэффициент попарной корреляции факторов, описывающих фон хроматограммы равен 0,998 [8,9]) со значениями факторов, полученных при использовании колонки, заполненной Диасорбом С18.

При всей неоднозначности оценки использования на хроматографе «Милихром-6» программного обеспечения «UniChrom» (г. Минск), в этом программном обеспечении есть опция «файл сохранить как ASCII файл {*.txt}», позволяющая представлять и использовать хроматограммы (в том числе многопараметровые) в цифровом виде. Эта, казалось бы, не слишком важная опция дает исследователю большие возможности по использованию метода ВЭЖХ с полипараметрическим детектированием для идентификации многокомпонентных систем, не имеющих конечного известного числа компонентов. Так, например, разработка анализатора подлинности вин на основе комбинированного метода «метод главных компонент – высокоэффективная жидкостная хроматография», невозможна на любом, за исключением «Милихрома-6», жидкостном хроматографе.

ВЫВОДЫ

Заметное повышение надежности и комфорта работы, а также появление ряда удачных свойств, делают хроматограф «Милихром-6» недорогим и эффективным инструментом аналитического сопровождения исследований и основой анализаторов, требующих использования дополнительного программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев, С.Н. Применение универсальных подвижных фаз в ВЭЖХ для анализа объектов пищевой промышленности, криминалистики и фармацевтической химии / С.Н. Сычев, К.С. Сычев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – Т.69. – № 9. – С. 8-11.
2. Сычев, С.Н. Универсальные элюенты в нормально-фазовой и обращенно-фазовой ВЭЖХ / С.Н. Сычев, К.С. Сычев // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2003. – Т 3. – Вып. 6. – С. 23 - 25.
3. Сычев, С.Н. Хроматографическая система для скринингового анализа в ОФ ВЭЖХ / С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина, Р.С. Музалевская, О.И. Мальцева // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2004. – Т.4 – Вып.2 – С. 112-118.
4. Микроколоночная жидкостная хроматография с многоволновой детекцией. Микроколоночный жидкостный хроматограф «Обь-4». / [Г.И. Барам, Ю.А. Болванов, М.А. Грачев и др.]. – Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1983. – 38 с.
5. ТУ 25-7405.0008-83. Хроматограф микроколоночный жидкостной «Милихром». Технические условия. / Сафронов О.Н., Панкратова Н.И., Терехова Л.И.– Орел: ПО «Научприбор», 1983.
6. Сычев, С.Н. Получение идентификационных признаков экстракта стевии комбинацией методов многоволновой ВЭЖХ и главных компонент / С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина, К.К. Полянский, Н.Д. Верзилина, Г.К. Подпоронова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2005. – № 12. – С. 36-39.

7. Сычев, С.Н. Идентификация фальсифицированных образцов растворимого кофе методом ВЭЖХ / С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина, О.И. Мальцева, Т.Е. Артемова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – № 9. – С.25-27.

8. Гаврилина, В.А. Применение метода главных компонент для идентификации и сравнения натуральных вин. Часть 1. Сущность применения метода главных компонент для описания и сравнения многокомпонентных физико-химических систем / В.А. Гаврилина, С.Н. Сычев, К.С. Сычев, О.И. Мальцева // Виноделие и виноградарство. – 2007. – № 1. – С. 10-12.

9. Гаврилина, В.А. Применение метода главных компонент для идентификации и сравнения натуральных вин. Часть 2. Критерии идентичности и подобия красных сухих при использовании комбинации метода главных компонент и высокоэффективной жидкостной хроматографии со спектрофотометрическим детектированием / В.А. Гаврилина, С.Н. Сычев, Д.С. Булгаков, К.С. Сычев, О.И. Мальцева // Виноделие и виноградарство, 2007. – № 3 – С. 30-32.

Сычев Сергей Николаевич

Орловский государственный технический университет, г.Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры «Химия» ОрелГТУ
Тел. 8(486)41-98-92
E-mail: chemistry@ostu.ru

Гаврилина Вера Александровна

Орловский государственный технический университет, г.Орел
Кандидат технических наук, доцент, инженер лаборатории «Жидкостная хроматография»
Тел. 8(486)41-98-92
E-mail: chemistry@ostu.ru

Сычева Елена Сергеевна

Орловский государственный технический университет, г.Орел
лаборант кафедры «Химия» ОрелГТУ
Тел. 8(486)41-98-92
E-mail: chemistry@ostu.ru

Уважаемые авторы!

Просим Вас ознакомиться с основными требованиями к оформлению научных статей.

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
 - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
 - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
 - не применять произвольные словообразования;
 - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

Рисунок 1 – Текст подписи

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.ostu.ru.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Адрес учредителя:

Орловский государственный технический университет
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 43-48-90
www.ostu.ru
E-mail: nmu@ostu.ru

Технический редактор О.Ю. Григорьева
Компьютерная верстка О.Ю. Григорьева

Подписано в печать 22.03.2010 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 7,9.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.