



Научный журнал
Орловского государственного
технического университета

Выходит четыре раза в год

№ 4-2/272(550)

2008

ИЗВЕСТИЯ ОрелГТУ

Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии

<p><i>Редакционный совет:</i> Голенков В.А., <i>председатель</i> Радченко С.Ю., <i>зам. председателя</i> Борзенков М.И. Колчунов В.И. Попова Л.В. Степанов Ю.С.</p> <p><i>Главный редактор серии:</i> Степанов Ю.С.</p> <p><i>Заместители главного редактора серии:</i> Гордон В.А. Киричек А.В. Константинов И.С. Подмастерьев К.В.</p> <p><i>Редколлегия:</i> Бабичев А.П. Вдовин С.И. Дмитриев А.М. Емельянов С.Г. Еременко В.Т. Зубарев Ю.М. Зубчанинов В.Г. Иванов Б.Р. Иванников А.Д. Колесников К.С. Корндорф С.Ф. Коськин А.В. Малинин В.Г. Осадчий В.Я. Панин В.Е. Поляков А.А. Распопов В.Я. Смоленцев В.П. Сотников В.В.</p> <p><i>Ответственный за выпуск:</i> Морозова А.В.</p> <p><i>Адрес редколлегии серии:</i> 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29 (4862) 43-48-90, 40-96-14 www.ostu.ru E-mail: nmu@ostu.ru</p> <p>Зарег. в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации. Свидетельство: ПИ № 77-15496 от 20 мая 2003 года</p> <p>Подписной индекс 29504 по объединенному каталогу «Пресса России»</p> <p>© ОрелГТУ, 2008</p>	<h3>Содержание</h3> <p>ТЕХНОЛОГИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 3 <i>Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Жирков А.А., Волобуев А.В., Тарасов Д.Е.</i> Информационное обеспечение статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием 4</p> <p><i>Белкин Е.А.</i> Геометрическое моделирование микрорельефа 12</p> <p><i>Бондарь А.В., Омигов Б.И., Смоленцев В.П., Уваров М.А.</i> Состояние и направления развития технологии авиакосмической отрасли 20</p> <p><i>Иноземцев А.Н., Анцев А.В.</i> Квалиметрическая оценка этапов жизненного цикла технологического проекта изготовления машины 25</p> <p><i>Киричек А.В., Афонин А.Н.</i> Моделирование нарезания резьб с помощью метода конечных элементов 29</p> <p><i>Хромов В. Н., Корнеев В. Н., Барабаш В. В.</i> Способ и горелка для газопламенного напыления порошковых материалов водородно-кислородным пламенем 33</p> <p><i>Коробко В.И., Бояркина О.В.</i> Статический метод оценки жесткости горизонтального шва двухслойных составных балок 40</p> <p><i>Уваров М.А., Смоленцев В.П., Омигов Б.И.</i> Восстановление качества транспортных машин 43</p> <p><i>Хромов В. Н., Корнеев В. Н., Барабаш В. В.</i> Взаимодействие продуктов сгорания водородно-кислородного пламени с материалом основы и порошкового материала при газопламенном напылении 49</p> <p><i>Михайлов Г.А., Сотников В.И., Гаврилин А.М.</i> Многозаходные сборные червячные фрезы уменьшенного диаметра 56</p> <p>ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ 60</p> <p><i>Ванин В.С., Фоминова О.В., Данилов В.А.</i> Оценка вибраций сидений машин с гусеничными движителями в стандартизованных условиях 61</p> <p><i>Давыдова Н.В., Корндорф С.Ф., Ногачева Т.И.</i> Определение параметров емкостной ячейки методом вольтметра-амперметра 66</p> <p><i>Егоров Б.А., Козюра А.В., Подмастерьев К.В., Семин А.А., Яковенко М.В.</i> Перспективы автоматизации метрологической проверки электрокардиоаппаратуры 69</p> <p><i>Захаров М.Г.</i> Диагностирование трибосистем в условиях помех электропараметрическими методами 77</p> <p><i>Лунин М. В., Бобров А.В.</i> Аспекты проектирования пузырькового расходомера . 82</p>
--	---

Журнал «Известия ОрелГТУ» входит в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, определенных ВАК, для публикации трудов на соискание ученых степеней.

Editorial council:
Golenkov V.A., president
Radchenko S.Y., vice-president
Borzenkov M.I.
Kolchunov V.I.
Popova L.V.
Stepanov Y.S.

Editor-in-chief
Stepanov Y.S.

Editor-in-chief Assistants:
Gordon V.A.
Kirichek A.V.
Konstantinov I.S.
Podmasteryev K.V.

Editorial Committee
Babichev A.P.
Vdovin S.I.
Dmitriev A.M.
Emelyanov S.G.
Eremenko V.T.
Zubarev Y.M.
Subchaninov V.G.
Ivanov B.R.
Ivannikov A.D.
Kolesnikov K.S.
Korndorf S.F.
Koskin A.V.
Malinin V.G.
Osadchy V.Ya.
Panin V.E.
Polyakov A.A.
Raspopov V.Ya.
Smolenzev V.P.
Sotnikov V.V.

Responsible for edition:
Morozova A.

Address
 302020 Orel,
 Naugorskoye Chaussee, 29
 (4862) 43-48-90, 40-96-14
 www.ostu.ru
 E-mail: nmu@ostu.ru

Journal is registered in State
 Committee of Russian Federation
 on printing. The certificate of
 registration ПИ № 77-15496 from
 20.05.03

Index on the catalogue of the «Pressa
 Rossi» 29504

© OSTU, 2008

Contents

TECHNOLOGIES AND MODELLING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES	3
<i>Kirichek A.V., Soloviev D.L., Zirkov A.A., Volobujev A.V., Tarasov D.E. DATAWARE</i>	
STATICS-impULSED PROCESSING surface strain hardening	4
<i>Belkin E.A. Geometrical modeling of microform</i>	12
<i>Bondar A.V., Omigov B.I., Smolenzev V.P., Uvarov M.A. State and areas of</i>	
technological development of aerospace sector	20
<i>Inozemtsev A.N., Antsev A.V. Qualimetric evaluation of machine's manufacturing</i>	
project lifecycle stages	25
<i>Kirichek A.V., Afonin A.N. Modeling of cutting threads with the help of the finite</i>	
element method	29
<i>Hromov V.N., Korenev V.N., Barabash V.V. Way and a torch for gas-flame spray of</i>	
powder materials by hydrogen-oxygen flame	33
<i>Korobko V.I., Boyarkina O.V. The static method for evaluation of rigidity of horizontal</i>	
weld two-leyar composite of beams	40
<i>Uvarov M.A., Smolenzev V.P., Omigov B.I. Quality restoration of transport machines..</i>	43
<i>Chromov V. N., Korenev V. N., Barabash V. V. Interaction of products of combustion of</i>	
a hydrogen-oxygen flame with a material of a basis and a powder material at flame	
spraying	49
<i>Mihajlov G.A., Sotnikov V.I., Gavrilin A.M. Multiputtiagin modular worm mills of the</i>	
reduced diameter	56
DIAGNOSTICS OF TECHNICAL SYSTEMS, DEVICES AND METHODS OF	
MEASUREMENT	
<i>Vanin V.S., Fominova O.V., Danilov V.A. Estimated vibrations of seats for cars with</i>	
caterpillar movers under standardized conditions	61
<i>Davidova N.V., Korndorf S.F., Nogachova T.I. Determination of parameters of capacity</i>	
cell by method of voltmeter-ampere meter	66
<i>Egorov B. A., Kozura A.V., Podmasteriev K.V., Semin A.A., Yakovenko M.V. Automation</i>	
prospects of electro-cardio appliances erification	69
<i>Zaharov M.G. Diagnosing of pairs friction in conditions of handicaps</i>	
electroparametrical methods	77
<i>Lunin M.V., Bobrov A.V. The aspects of designing the bubble flowmeter</i>	82

ТЕХНОЛОГИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.787.6

КИРИЧЕК А.В., СОЛОВЬЕВ Д.Л., ЖИРКОВ А.А., ВОЛОБУЕВ А.В., ТАРАСОВ Д.Е.

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Разработаны алгоритм определения показателей качества поверхностного слоя по заданным значениям параметров статико-импульсной обработки (прямая задача) и алгоритм расчета параметров статико-импульсной обработки в зависимости от требуемых показателей качества поверхностного слоя, а также программное обеспечение для их реализации.

The Designed algorithms of the determination of the factors quality surface layer on divided importances parameter static-impulse processing (the straight line problem) and calculation parameter static-impulse processing depending on required factors quality surface layer, as well as software for their realization.

Упрочняющая обработка является важной технологической операцией для повышения прочности и долговечности тяжелонагруженных деталей машин. Наибольший эффект от ее применения возможен только при строгом соответствии режимов упрочнения и получаемых в результате показателей качества упрочненного поверхностного слоя: шероховатости поверхности, твердости, глубине упрочненного поверхностного слоя и т.д. Особенно остро эта проблема стоит при деформационном упрочнении, способами, использующими для нагружения энергию удара. Это связано с тем что результаты упрочнения при использовании ударной нагрузки будут зависеть не только от значений кинетической энергии ударов, но и от способа ее сообщения в очаг деформации. Управлять энергией сообщаемой в очаг деформации достаточно эффективно можно с помощью статико-импульсной обработки (СИО) [1]. Представляя удар в виде волн деформации, распространяющихся по ударной системе и формирующих ударный импульс в очаге деформации, при СИО можно достаточно точно управлять процессом упрочнения, рационально распределять энергию удара и интенсифицировать упругопластическую деформацию, создавая глубину упрочненного слоя в 3...4 раза больше чем другими способами поверхностного пластического деформирования (ППД). В отличие от известных ударных способов ППД, СИО использует дополнительные параметры, управляющие формой ударных импульсов.

Все параметры СИО можно разделить на технологические и конструктивно-технологические [2].

Технологическими являются параметры, оказывающие существенное влияние на характер протекания процесса и его результаты, изменение значений которых обеспечивается без какого-либо изменения конструкции оснастки. Основными технологическими параметрами СИО являются энергия и частота ударов, предварительное статическое поджатие инструмента к упрочняемой поверхности, которое необходимо только для наиболее полного использования энергии волн деформации, скорость подачи.

Под конструктивно-технологическими подразумеваются параметры, характеристики которых могут при необходимости меняться без трансформации или с незначительной трансформацией конструкции оснастки. Такими параметрами для СИО являются, форма и размеры деформирующего инструмента, форма и размеры элементов ударной системы, состоящей и бойка и волновода. Боек в ударной системе для СИО является неотъемлемой частью генератора импульсов (гидроударного устройства, осуществляющего СИО), поэтому его форму и размеры не целесообразно изменять в процессе подготовки производства в отличие от волновода. Основными конструктивно-технологическими параметрами, регулирующими форму ударного импульса в ОД (при условии, что боек и волновод

изготовлены из одного материала) являются площадь поперечного сечения и длина волновода.

В результате комплекса теоретико-экспериментальных исследований установлены взаимосвязи между параметрами СИО и показателями качества поверхностного слоя: твердостью упрочненного слоя, его глубиной, шероховатостью поверхности, а также равномерностью упрочнения. Это позволяет решать как прямую задачу – определение показателей качества поверхностного слоя по заданным значениям параметров СИО, так и обратную – расчет параметров СИО в зависимости от требуемых показателей качества поверхностного слоя.

При применении СИО на практике более востребованной является обратная задача. Исходными данными для ее расчета являются: характеристики упрочняемого материала: марка, исходная твердость H_0 ; требуемые показатели качества поверхностного слоя: степень упрочнения, оцениваемая через приращение твердости упрочненного поверхностного слоя ΔH , глубина упрочнения h , равномерность упрочнения, оцениваемая через коэффициент перекрытия отпечатков K [1], шероховатость поверхности R_a . Полученные в результате расчета параметры СИО должны обеспечивать глубину и степень упрочнения не менее заданных, а шероховатость не более заданной. В начале расчета задаются исходные данные, характеризующие конструктивные и энергетические параметры генератора импульсов и установки для СИО: длина и диаметр бойка L_1 , и d_1 , диапазон регулирования энергии ударов $A_{y \min} \dots A_{y \max}$, частоты ударов $f_{\min} \dots f_{\max}$, максимальная скорость подачи заготовки относительно инструмента s_{\max} .

Методика расчета включает в себя следующие этапы.

I этап. Определение коэффициента перекрытия отпечатков K в зависимости от требуемой глубины, степени и равномерности упрочнения. Коэффициент перекрытия является обобщающей характеристикой, связывающей размеры отпечатков с их перекрытием и зависящей от размера отпечатка δ , измеряемого в направлении подачи, скорости подачи s , частоты ударов f . Выбор коэффициента перекрытия осуществляется на основании экспериментальной зависимости $\Delta H = f(h, K)$.

II этап. Определение требуемой глубины и степени упрочнения под единичным отпечатком. Этап реализуется экспериментальным путем: глубина и степень упрочнения могут быть определены по полученным ранее на этапе I зависимостям $\Delta H = f(h, K)$, при $K = 0$ (когда перекрытие отпечатков отсутствует).

III этап. Вычисление размеров инструмента и энергии ударов, затрачиваемой на упругопластическую деформацию. Для этого используются теоретические зависимости для расчета глубины упрочнения под отпечатком, полученным при единичном ударе, которые связывают между собой размеры инструмента, энергию ударов и глубину упрочнения. Зависимости основаны на положениях теории упругости, согласно которым определяются главные напряжения σ_x , σ_y и σ_z , возникающие в полупространстве, нагруженном давлением, произвольным образом распределенным по поверхности эллиптической площадки контакта, из которых определяется эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв}}$. Для расчета глубины упрочнения используется гипотеза Губера – Мизеса средних касательных напряжений, согласно которой рассчитанные значения $\sigma_{\text{экв}}$ могут быть приравнены к пределу текучести нагружаемого материала σ_T . По требуемой глубине упрочнения, установленной на этапе II, путем перебора определяются энергия ударов и размеры инструмента. При этом должно соблюдаться условие по которому требуемая энергия ударов удовлетворяет диапазону $A_{y \min} \dots A_{y \max}$.

IV этап. Вычисление статической составляющей нагрузки. Определяется минимально необходимое предварительное статическое поджатие инструмента к упрочняемой поверхности, для обеспечения неразрывного контакта инструмента с нагружаемой поверхностью, способствующее рекуперации отраженных волн деформации и использованию их для пластической деформации. Величина статической составляющей

нагрузки выбирается из условия, что она должна быть не менее 0,1 от величины динамической [3].

V этап. Уточнение геометрических параметров волновода. Для этого используются теоретические модели, позволяющие рассчитать форму ударного импульса в очаге деформации [4]. Параметрами модели являются скорость удара, геометрические и акустические параметры ударной системы боек-волновод, коэффициент сопротивления нагружаемого материала внедрению инструмента, определяемый через исходную твердость нагружаемого материала и кривизну контактных поверхностей инструмента и детали.

VI этап. Определение настроечных параметров гидравлического генератора импульсов, обеспечивающих требуемую энергию ударов. Этап может осуществляться как при использовании теоретических исследований, так и экспериментальных. Теоретически расчет производится по моделям, описывающим движение бойка генератора импульсов в любой момент времени в зависимости от соответствующих настроек давления и расхода рабочей жидкости. Модели подтверждены экспериментальными исследованиями, в результате которых построены регрессионные зависимости, которые также могут использоваться для определения настроек генератора импульсов [1].

VII этап. Определение коэффициента перекрытия K с учетом требуемой шероховатости поверхности. Используются экспериментальные зависимости $R_a = f(K)$.

VIII этап. Определение требуемой частоты ударных импульсов f и скорости подачи s . Осуществляется исходя из полученного коэффициента перекрытия K и размеров отпечатков δ (величина δ определяется из расчетов на этапе III) по формуле $f = s / [(1 - K)\delta 60]$. Определение f и s осуществляется перебором значений, с учетом того, что значение f должно удовлетворять диапазону $f_{\min} \dots f_{\max}$.

Решение алгоритмов прямой и обратной задачи может быть реализовано в ручную, при этом необходимо осуществить несколько циклических переборов, что значительно увеличивает трудоемкость и время затраченное на решение задач. Поэтому разработан программный продукт, позволяющий автоматизировать расчеты, используя который можно значительно сократить время расчетов, а также провести исследования взаимосвязей между технологическими и конструктивно-технологическими параметрами СИО и показателями качества поверхностного слоя в более широком диапазоне, расширить рекомендации по применению процесса СИО.

Программа имеет возможность:

- создания, редактирования и копирования проектов и отдельных задач проекта;
- проведения расчетов в заданном диапазоне одного или двух варьируемых параметров;
- создания и редактирования диаграмм;
- формирования отчетов;
- печати исходных данных, результатов расчета, диаграмм и отчетов;
- экспорта исходных данных, результатов расчета, диаграмм и отчетов в программы «Microsoft Word» и «Microsoft Excel».

Структура программно-информационного обеспечения представлена на рисунке 1.

Главным элементом структуры управления программы является «Панель управления», которая позволяет создавать, открывать и сохранять проекты, осуществлять доступ и управление другими модулями, пользоваться справочником по программно – информационному обеспечению (кнопка «Помощь») и переходить в режим интерактивного обучения (кнопка «Обучение»). Вновь открытый или созданный проект получает статус *текущего проекта*. Элементы структуры *текущего проекта* объединены пунктирной линией. Штрихпунктирной линией выделена единая структура модулей программы:

- редактор задач;
- редактор результатов;
- модуль диаграмм;

- модуль расчета;
- модуль формирования отчетов;
- модуль печати;
- модуль экспорта данных.

В отличие от «Панели управления» модули имеют возможность взаимодействия только лишь с элементами *текущего проекта*. Структура модулей программы подчинена главному компоненту – «Панели управления», который имеет возможность управления каждым. Вместе с тем некоторые модули могут непосредственно взаимодействовать между собой (например «Модуль диаграмм» и «Модуль расчета»).

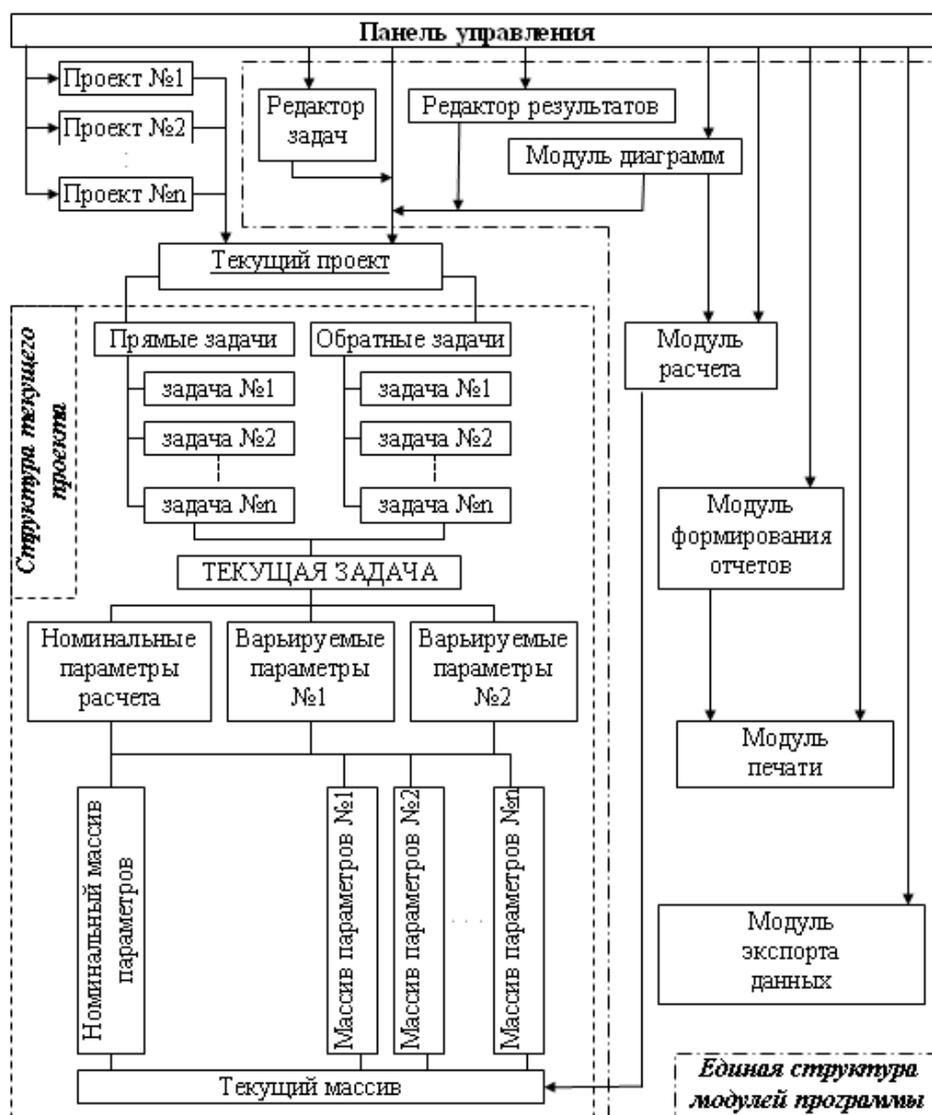


Рисунок 1 - Структура программно-информационного обеспечения

После запуска программы «Панель управления» (рис. 2) отображается узкой полосой в верхней части экрана монитора, другие модули функционируют в оставшейся части.

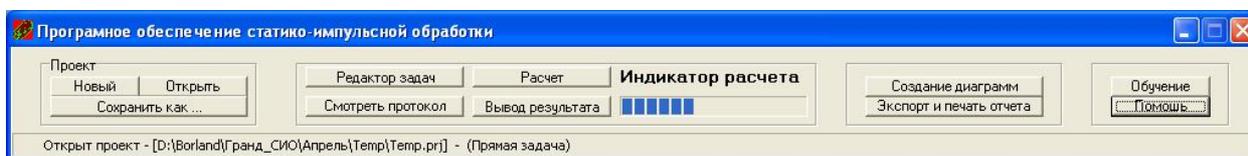


Рисунок 2 - Панель управления

«Редактор задач» (рис. 3) предназначен для редактирования исходных данных прямой и обратной задач проекта. Выбор типа задачи осуществляется путем переключения соответствующих закладок «Таблицы данных проекта». В зависимости от типа выбранной задачи формируется содержание таблицы. Таблица данных проекта имеет два режима редактирования данных – краткий и расширенный. В кратком режиме отображаются «Режимы обработки» для прямой и «Требуемые показатели качества» для обратной задачи. В расширенном режиме допускается редактирование всех возможных параметров выбранной задачи. Редактор задач имеет возможность открытия, сохранения, печати исходных данных, а также оснащен помощью.

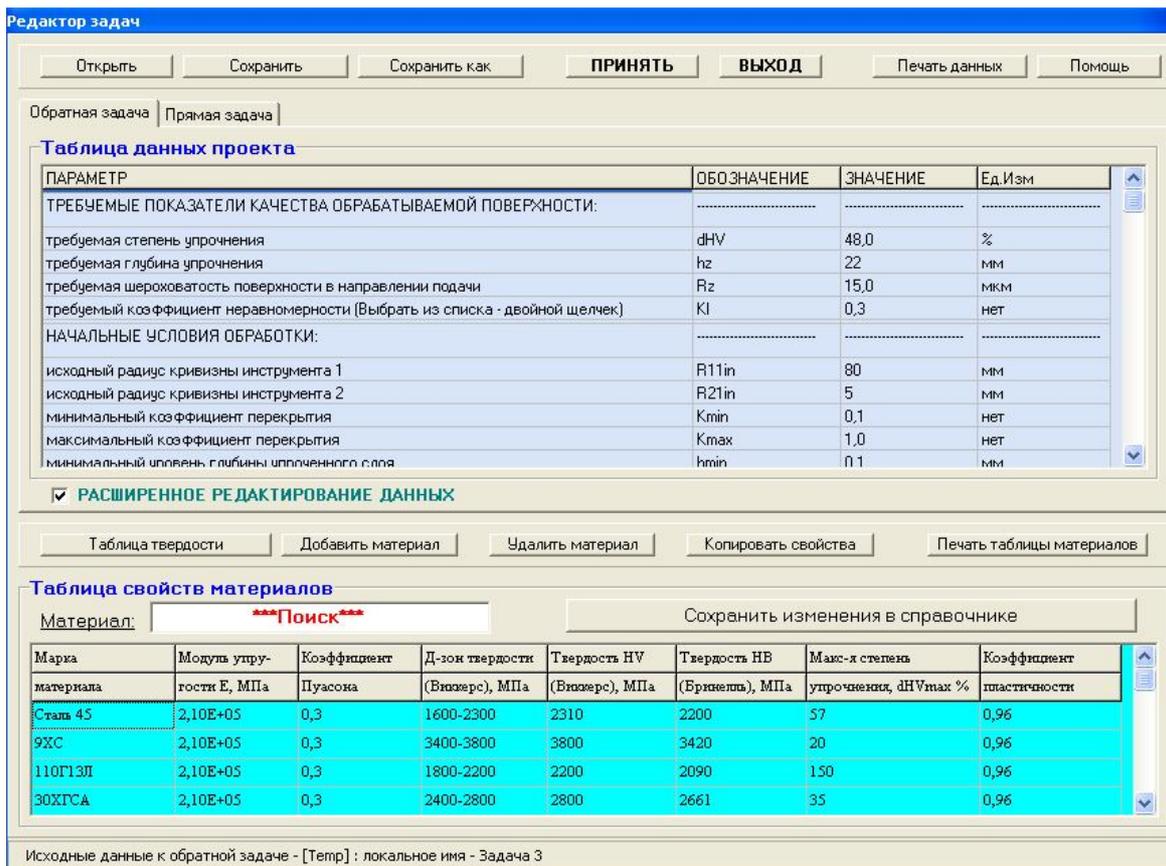


Рисунок 3 - Редактор задач

«Редактор результатов» (рис. 4) предназначен для просмотра и печати результатов расчета текущей задачи, других задач проекта и значений в отдельных точках диаграммы.

«Модуль расчета» (рис. 5) позволяет производить расчет текущей задачи и управлять его процессом. После запуска модуля на экране отображается окно разделенное на четыре части, три из которых содержат таблицы. Внизу отображается строка, содержащая имя текущего проекта, тип и имя текущей задачи и номер точки в которой будет производиться расчет. Таблицы имеют технологическое назначение. Изменение их содержания при расчете позволяет судить о самом процессе расчета. В левом нижнем углу ведется протокол расчета.

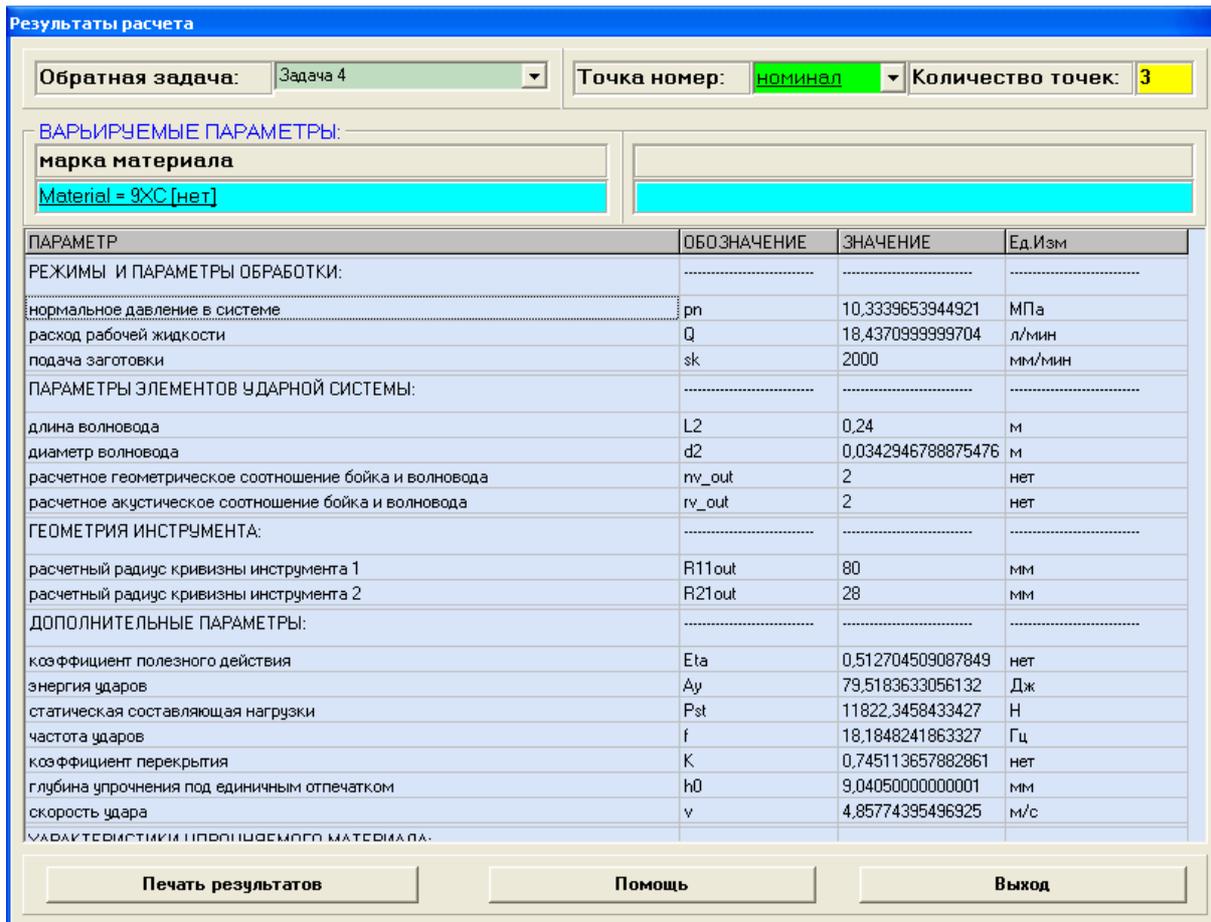


Рисунок 4 - Редактор результатов

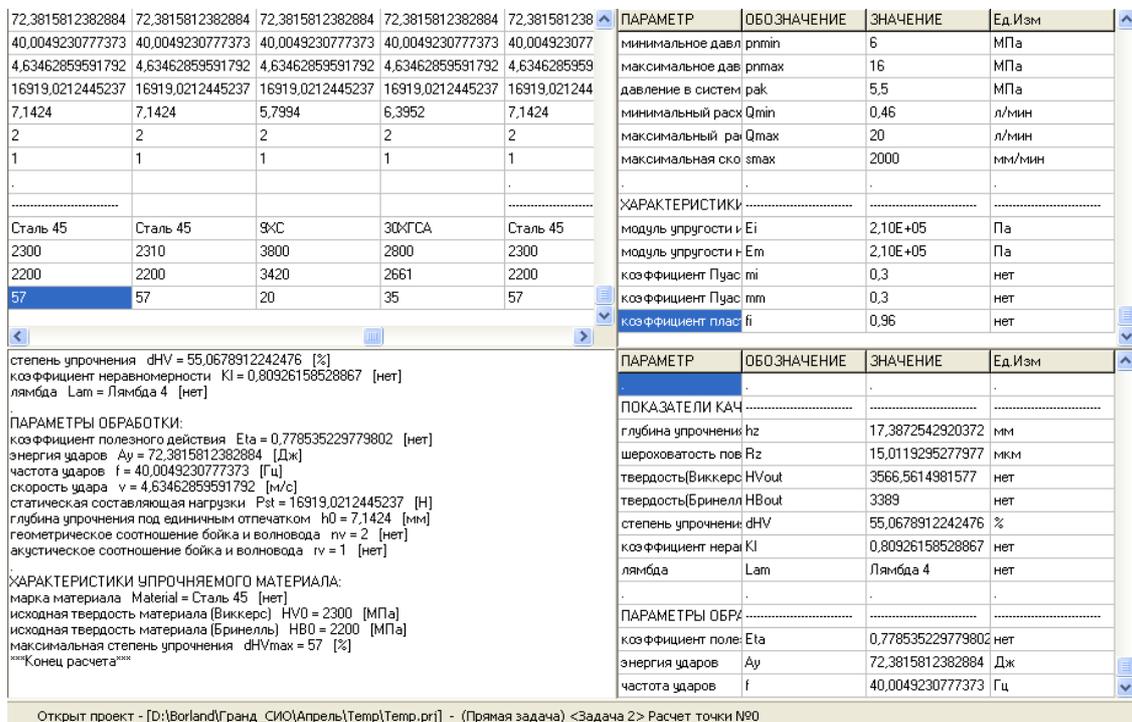


Рисунок 5 - Модуль расчета

«Модуль диаграмм» (рис. 6) предназначен для создания и редактирования, экспорта и печати диаграмм. Максимальное число варьируемых параметров при построении равно двум.

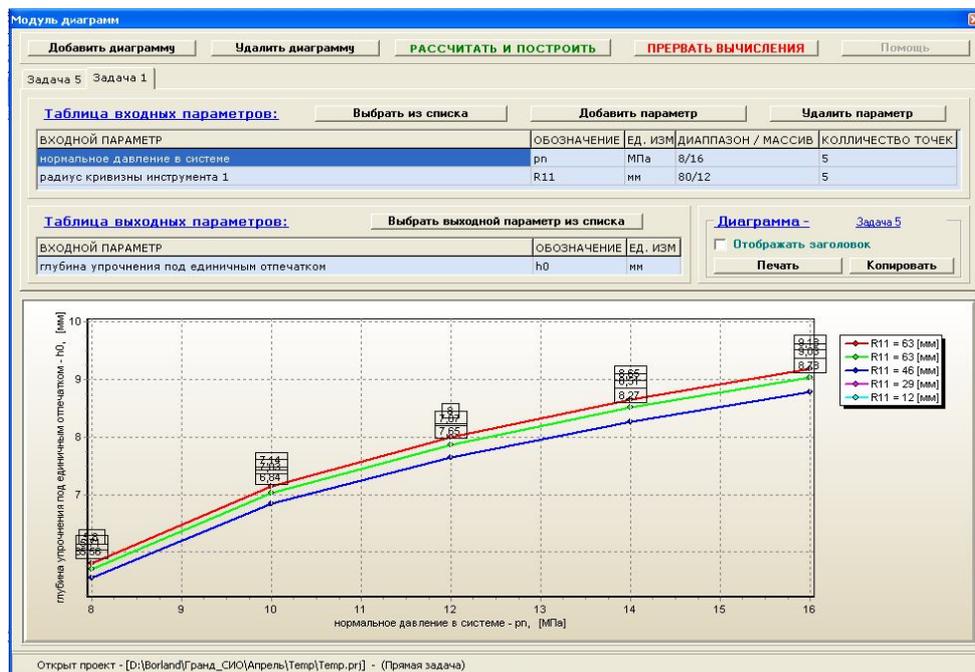


Рисунок 6 - Модуль диаграмм

«Модуль отчетов» (рис. 7) предназначен для компоновки исходных данных и результатов расчетов задач проекта для последующего экспорта в другие программы (например, "Microsoft Word" и "Microsoft Excel"), и печати. После запуска модуля в верхней части окна формируются списки «прямых» и «обратных» задач проекта. Печать производится через «Модуль печати», который позволяет устанавливать диалог с печатающим устройством и производить его настройку, определять тип и конфигурацию печатаемого документа, а также выполнять его предварительный просмотр.

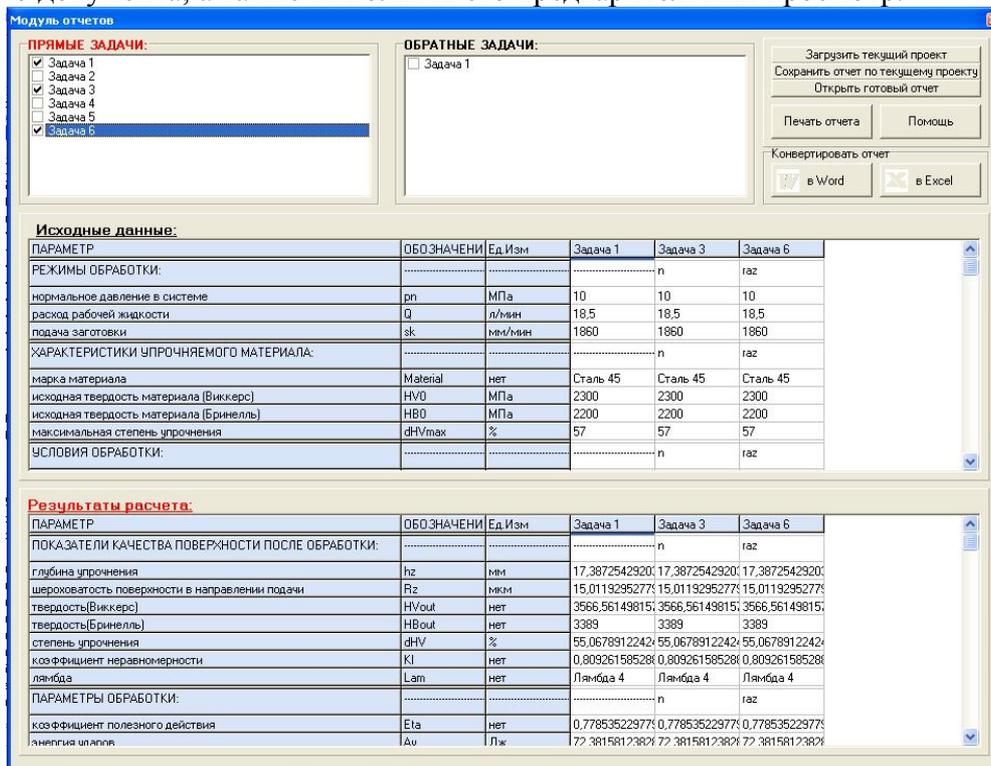


Рисунок 7 - Модуль отчетов

Наибольшую практическую ценность имеет возможность полученного программного продукта рассчитать значение конструктивно-технологических и технологических параметров СИО в зависимости от требуемых свойств упрочненной поверхности (обратная задача). В результате могут быть определены параметры СИО обеспечивающие степень упрочнения до 100...150 %, глубину упрочненного поверхностного слоя до 8...10 мм, различную степень равномерности упрочнения, шероховатость поверхности, достигающую $R_a = 0,08$ мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Параметры упрочняющей статико-импульсной обработки // СТИН. 2005. № 2. С. 30-33.
3. Соловьев Д.Л. Деформационное упрочнение способом статико-импульсного нагружения. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 10. С.3-6.
4. Механика нагружения поверхности волной деформации. А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Ю.С. Степанов, Д.Л. Соловьев. М.: Машиностроение-1, 2005. 149 с.

Исследования выполнены при поддержке гранта МД-2698.2007.8

Андрей Викторович Киричек

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
директор Технологического института ОрелГТУ
тел./ fax (4862)555524, E-mail: avk@ostu.ru

Дмитрий Львович Соловьев

Муромский институт Владимирского государственного университета
Доктор технических наук, профессор кафедры «Станки и инструмент»
тел.(49234)32022, fax (49234)22885, E-mail: murstin@yandex.ru

Александр Александрович Жирков

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы»
тел./ fax (4862)555524, E-mail: ti@ostu.ru

Александр Владимирович Волобуев

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
тел./ fax (4862)555524, E-mail: ostu@ostu.ru

Дмитрий Евгеньевич Тарасов

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
тел./ fax (4862)555524, E-mail: ostu@ostu.ru

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА

Разработана теория построения трехмерной геометрической модели микрорельефа поверхностного слоя на основе модульно-геометрического принципа. Разработана конструкция прибора активного контроля над процессом формирования микрорельефа, принцип действия которого основан на понятии динамической голографии. Разработан способ формирования микрорельефа по заданным геометрическим характеристикам.

.According to the authors' concept for calculation components with profile surfaces the methods of tensor analysis are advisable it is important that the surface which has no analytical model from the field of classical differential geometry should be written with the mathematical angle. This idea is also the foundation for the research in the field of new technologies for abrasive machining.

1. Теория

Одной из причин, существенно влияющих на информационную полноту аналитического описания микрорельефа поверхности, является применение итерационных и статистических методов, в основе которых отсутствует понятие кривизны поверхности в локальной области заданной точки – вершине модуля – соприкасающегося параболоида, которая оценивается тензором Римана – Кристоффеля.

Так метод статистического описания абразивных поверхностей при помощи теории цепей Маркова позволяет построить только двумерную модель, включающую такты резания вдоль идеализированной линии в направлении резания. Это не позволяет учитывать форму режущих кромок в направлении, перпендикулярном к вектору скорости резания и их положение по отношению к последующим кромкам, что необходимо при объяснении процесса съема материала.

Поэтому разработка методов математического моделирования, позволяющих восполнить информационный недостаток в описании микрорельефа поверхности, занимает важное место в теории формообразования.

К основной причине, не позволяющей построить достаточно строгую трехмерную геометрическую модель, адекватную реальному микрорельефу, относят: использование в одномерных моделях микрорельефа совокупность параметров шероховатости R_a , R_z , R_{max} и др. и параметров $\omega_n, \zeta, \gamma_0, \phi_1, \theta_1, \Theta_1$ - в двумерных моделях.

До настоящего времени нет достаточно полных и хорошо обоснованных трехмерных геометрических моделей микрорельефа в математических моделях формообразующей и обработанной поверхности. Таким образом, для структурирования трехмерной геометрической модели микрорельефа следует применять новые научные подходы.

Разработан модульно-геометрический метод математического моделирования микрорельефа поверхности.[1]

Дано теоретическое обоснование модульно-геометрического метода математического моделирования микрорельефа. Классификация поверхностей сложной формы с геометрической точки зрения не может иметь научного обоснования. Общие признаки в структуре поверхностей отсутствуют. Поверхность сложной формы структурируется на основе модульного принципа, метод структурирования определяется задачами теории формообразования. Модульно-геометрический метод, который используется для решения этих задач, заключается в аппроксимации локального участка поверхности соприкасающимся параболоидом. Геометрической характеристикой для оценки кривизны локального участка является тензор Римана-Кристоффеля. Аналитическое задание соприкасающегося параболоида как геометрического образа второго порядка соприкосновения с данным локальным участком поверхности определяется из разложения в

ряд Тейлора. Ряд Тейлора также определяет геометрические образы более высокого порядка соприкосновения: куболоид, квадролоид и т.д. Кривизна поверхности в точке соприкосновения оценивается углом поворота вектора, перенесенного параллельно самому себе по замкнутому контуру, охватывающему точку соприкосновения и принадлежащему ее локальной области, на соприкасающейся поверхности: параболоиде, куболоиде и т.д. Угол поворота на рассматриваемой поверхности зависит от координат вектора:

$$d_1x^v d_1x^\mu \left[2\partial_{[v} \Gamma_{\mu]\lambda}^\chi + 2\Gamma_{[v|\rho|] \lambda}^\chi \right] v^\lambda + d_1x^v d_2x^\mu d_2x^\tau \left[\Gamma_{\tau\lambda}^\sigma \partial_\mu \Gamma_{v\sigma}^\chi - \Gamma_{\mu\nu}^\rho \partial_\tau \Gamma_{\rho\lambda}^\chi - \Gamma_{\mu\nu}^\rho \Gamma_{\rho\sigma}^\chi \Gamma_{\tau\lambda}^\sigma \right] v^\lambda + d_1x^v d_2x^\mu d_2x^\tau d_2x^\omega \left[-\Gamma_{\mu\nu}^\rho \Gamma_{\tau\lambda}^\sigma \partial_\omega \Gamma_{\rho\sigma}^\chi \right] v^\lambda + d_1x^v d_2x^\mu d_1x^\tau d_2x^\omega \left[\Gamma_{\mu\omega}^\rho \Gamma_{\tau\lambda}^\sigma \partial_v \Gamma_{\rho\sigma}^\chi \right] v^\lambda,$$

где $\Gamma_{\rho\sigma}^\chi$ - коэффициенты аффинной связности второго рода,

индексы $v, \mu, \tau, \omega, \dots = 1, 2$; d_1x^v, d_2x^μ - дифференциалы координатных векторов.

Этот вектор равен разности двух векторов, полученных в результате параллельного переноса вектора v^λ из вершины инфинитезимального параллелограмма в противоположащую вершину вдоль его сторон, составляющих различные части замкнутого контура. Отсюда следует, что выражения в квадратных скобках есть тензоры. Так,

$$R_{v\mu\lambda}^\chi = 2\partial_{[v} \Gamma_{\mu]\lambda}^\chi + 2\Gamma_{[v|\rho|] \lambda}^\chi \Gamma_{\mu}^\rho -$$

тензор Римана-Кристоффеля, существенная компонента которого R_{1212} дает угол поворота вектора при параллельном переносе по замкнутому контуру на соприкасающемся параболоиде, ограничивающего локальную область его вершины. Порядок точности определения ковариантного дифференциала, характеризующего изменение координат вектора, не позволяет рассчитать кривизну квадролоида. Геометрическая структура куболоида не исследована. В технических приложениях следует ограничиться аппроксимацией локального участка соприкасающимся параболоидом, так как можно постулировать: кривизна поверхности в точке соприкосновения равна кривизне соприкасающегося параболоида.

Дискретно-определённую поверхность обрабатываемой детали, в общем случае можно аппроксимировать набором модулей, имеющих гладкую «сшивку», каждый из которых представляет собой соприкасающийся параболоид определенного типа.

Установлено, что модульный принцип, применяемый для описания геометрии каркасных дискретно-определённых поверхностей, при абразивной обработке детали, может быть принят за основу для структурирования микрорельефа поверхности.

При построении математической модели, описывающей микрорельеф поверхности, используется модульный принцип структурирования поверхности сложной формы с решением вопросов негладкой «сшивки» отдельных модулей.

Рассмотрение формирования микрорельефа поверхности детали из-за сложности реально протекающих явлений проводится для идеальной модели со следующими допущениями: окружающая среда (СОТС) не оказывает действия на трехмерную геометрическую модель микрорельефа поверхности, химическим, тепловым и динамическим взаимодействием инструмента и детали можно пренебречь.

Получено аналитическое представление для соприкасающегося параболоида через главные кривизны поверхности. Из уравнений для полной и средней кривизны поверхности соприкасающегося параболоида:

$$K = k_1 k_2 = \frac{R_{1221}}{g_{11} g_{22} - g_{12}^2},$$

$$H = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) = \frac{1}{2} * \frac{B_{11} g_{22} + B_{22} g_{11}}{g_{11} g_{22} - g_{12}^2};$$

где: K – гауссова или полная кривизна поверхности,

H – средняя кривизна поверхности,

k_1, k_2 – главные кривизны поверхности,

g_{11}, g_{12}, g_{22} – компоненты метрического тензора,

R_{1221} – существенная компонента тензора Римана-Кристоффеля (тензора кривизны).

Из уравнения Гаусса:

$$R_{1221} = B_{11}B_{22},$$

Для точки соприкосновения исследуемой поверхности и соприкасающегося параболоида в приближении:

$$g_{11}g_{22} - g_{12}^2 = 1;$$

$$g_{11} = g_{22} = 1;$$

где данная точка имеет координаты $X=0, Y=0$.

Аналитическое представление для соприкасающегося параболоида:

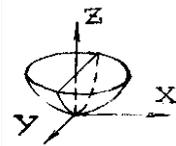
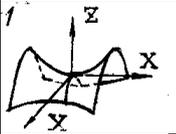
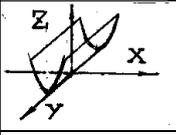
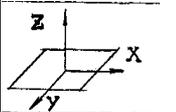
$$Z = 1/2(k_1X^2 + k_2Y^2),$$

Полученное представление для соприкасающегося параболоида через главные кривизны поверхности является важным результатом, на основе которого сделан численный расчет модульной геометрической модели микрорельефа поверхности.

Определена система критериев для количественной оценки топографии микрорельефа: k_1, k_2 – главные кривизны поверхности, R_z – высота микро неровности. Выдвинута теоретически обоснованная гипотеза об информационной полноте системы критериев топографии микрорельефа.

Геометрическая модель микрорельефа представляет собой совокупность модулей, имеющих негладкую «сшивку» - соприкасающихся параболоидов. Каждый соприкасающийся параболоид может быть представлен, как один из четырех типов, указанных в табл. 1. каждый тип соприкасающегося параболоида имеет соответствующую ориентацию по отношению к оси Z в локальной системе координат XYZ .

Таблица 1 – Типы соприкасающегося параболоида

Тип поверхности	Название	Приведенное уравнение	Вид поверхности	B_{11}	B_{22}
I	Эллиптический параболоид	$2pz = \frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2}$	 $p=1$	$\frac{1}{pa^2}$	$\frac{1}{pb^2}$
II	Гиперболический параболоид	$2pz = \frac{X^2}{a^2} - \frac{Y^2}{b^2}$	 $p=1$	$\frac{1}{pa^2}$	$-\frac{1}{pb^2}$
III	Параболический цилиндр	$2pz = X^2/a^2$	 $p=1$	$\frac{1}{pa^2}$	0
IV	Плоскость	$z = 0$		0	0

Где: $a, b \in R; p = \pm 1; B_{11}, B_{22}$ – коэффициенты второй квадратичной формы.

Проверка точности модели при аппроксимации поверхности микрорельефа по экспериментальным данным состояла в оценке максимальной погрешности $\delta_{z \max}$ при сопряжении поверхностей, рассчитанных для двух соседних расчетных точек. Значение $\delta_{z \max}$ определялось как отношение максимального скачка по оси Z при сопряжении двух соседних параболоидов к интервалу изменения значений экспериментальных данных по оси Z : $Z_{ij \max} - Z_{ij \min}$. Проведенные расчеты показали, что точность представления поверхности зависит от числа расчетных точек, приходящихся на интервал пика или впадины микрорельефа.

Сформулирована задача расчета коэффициентов модулей (табл.2) микрорельефа поверхности, в общем случае: поверхность разбивается через выбранный шаг по оси z , декартовой системы координат xuz , плоскостями параллельными плоскости xu и однопараметрическим семейством поверхностей. Шаг разбиения семейством поверхностей задается по параметру семейства. Определяются точки пересечения микрорельефа и семейств параллельных плоскостей и поверхностей. По пяти точкам восстанавливается модуль – локальный участок поверхности – как часть поверхности соприкасающегося параболоида. Решение задачи расчета коэффициентов модулей в частном случае для плоской поверхности детали [2] состоит в следующем:

Таблица 2 - Определение вида модуля трехмерной геометрической модели (ТГМ) микрорельефа

№	Вид модуля ТГМ	Знак коэффициентов
1.	$k_1X^2+k_2Y^2 \geq -2Z;$	$k_1>0; k_2>0;$
2.	$k_1X^2+k_2Y^2 \leq -2Z;$	$k_1<0, k_2<0;$
3.	$k_1X^2+k_2Y^2 \geq 2Z;$	$k_1>0; k_2<0; (k_1<0, k_2>0);$
4.	$k_2Y^2 \geq -2Z;$	$k_1=0; k_2>0, (k_1=0, k_2<0);$
5.	$Z \leq 0;$	$k_1=0; k_2=0.$

В глобальной системе прямоугольных декартовых координат задано поле точек, определяемое n значениями по оси X и m значениями по оси Y . Для каждой точки (x_i, y_j) , $i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}$; известно значение z_{ij} . (рис.1,2)

Шаг разбиения по оси x : $\Delta x = (x_n - x_1) / n$. Шаг разбиения по оси y : $\Delta y = (y_m - y_1) / m$.

В узле- $(x_{i+1}; y_j; z_{k+1})$ на базовой площадке $L_x \times L_y$,

где:

$$1 \leq i \leq n_x + 1, 1 \leq j \leq n_y + 1, 1 \leq k \leq (1 + n_x)(1 + n_y);$$

$$n_x = \frac{L_x}{\Delta x}, n_y = \frac{L_y}{\Delta y},$$

определяют по точкам пересечения реальных профилей микрорельефа радиусы кривизны R_{l1}, R_{l2} по трем точкам в сечениях $x_{i+1}; y_j$; . (рис.3,4)

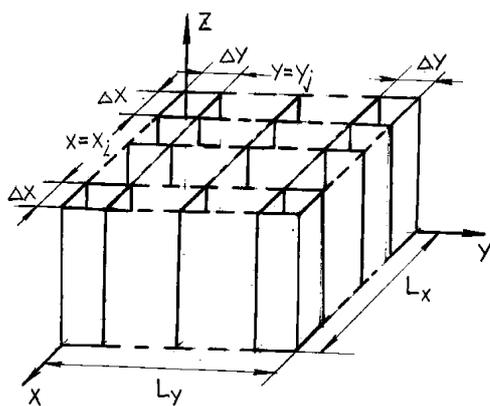


Рисунок 1 - Модель разбиения микрорельефа взаимно перпендикулярными плоскостями

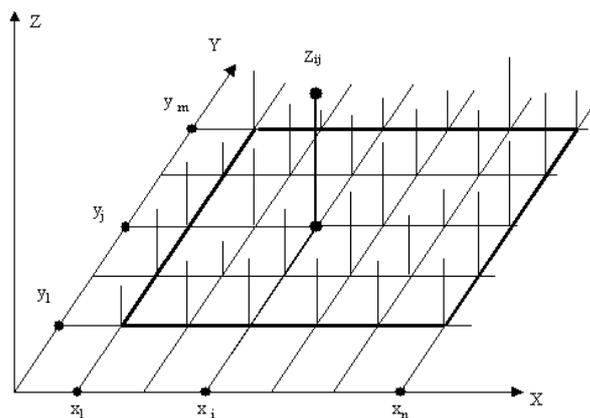


Рисунок 2 - Исходные данные для расчета микрорельефа

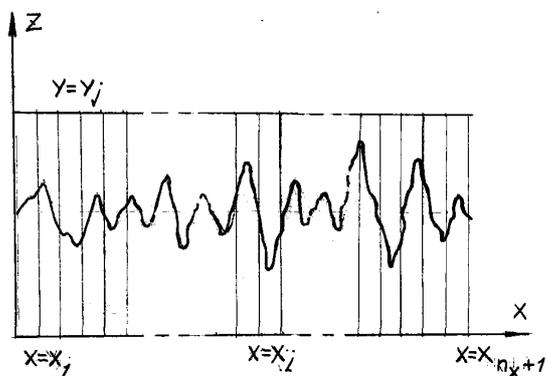


Рисунок 3 - Разбиение микрорельефа в плоскости $y = y_j$

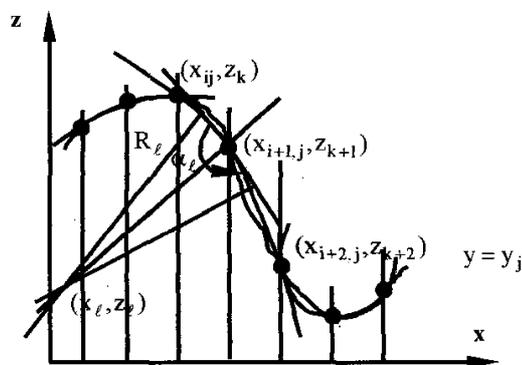


Рисунок 4 - Схема к расчету радиуса кривизны в сечении $y = y_j$

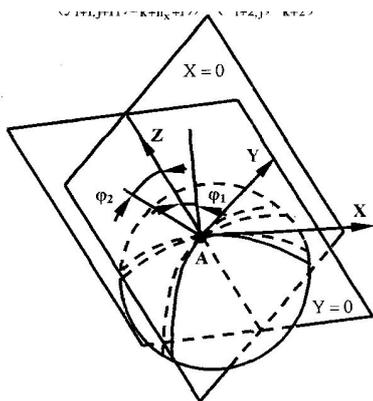


Рисунок 5 - Система координат XYZ в точке соприкосновения

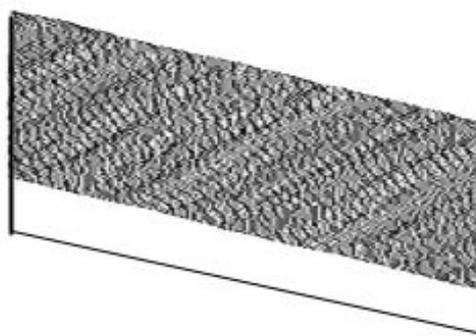


Рисунок 6 - Модульная геометрическая модель микрорельефа поверхности $30 \times 6 \text{ мкм}$, образца после плоского шлифования: (шаг сканирования $0,001 \text{ мкм}$)

На основе теоремы Менье вычисляют нормальные кривизны в сечениях $x_{i+1}; y_j$:

$$k_{1n} = \frac{\cos \varphi_1}{R_{\ell,1}}; \quad k_{2n} = \frac{\cos \varphi_2}{R_{\ell,2}},$$

где φ_1 и φ_2 - углы между главной нормалью параболоида и нормальями дуг окружностей в сечениях $x_{i+1}; y_j$.

Пологая, что нормальная кривизна в одном из сечений равна главной кривизне $k_1 = k_{1n}$, по индикатрисе Дюпена определяют главную кривизну k_2 в сечении, перпендикулярном выбранному сечению. (рис. 5,6)

По значениям k_1 и k_2 определяют вид модуля геометрической модели в локальной декартовой прямоугольной системе координат XYZ с началом координат в узле- $(x_{i+1}; y_j)$.

Разработаны методики численного расчета микрорельефа поверхностей: плоской, круглой цилиндрической, каркасной дискретно-определенной и тела неправильной формы [3].

2. Приборы контроля над процессом формирования микрорельефа

Современные приборы контроля сконструированы таким образом, что регистрирующие устройства фиксируют значения параметров с контурных карт объекта. Контурные карты определяются или с большими погрешностями, или за достаточно большой интервал времени. Осуществить контроль над труднодоступным объектом – абразивным зерном, движущимся в материале детали, не представляется возможным.

Существует один из путей расширения возможностей контролирующих устройств и использования информации полученной с их помощью, для построения трехмерных моделей, применение приборов исследующих голографическое изображение объекта.

Принцип контроля рассматриваемых приборов основан на последних исследованиях процессов получения голографического изображения объекта в оптическом и рентгеновском диапазонах. Приборы этой серии позволяют изучать процессы обработки не в проекции на плоскость, а в пространстве.

3. Рентгенопрофилограф активного контроля

Задача, на решение которой направлено предлагаемое устройство, состоит в обеспечении возможности осуществления контроля над формированием микро геометрии поверхностного слоя детали в процессе абразивной обработки и исследования механизма процессов, сопутствующих формированию микрорельефа: стирания скола, выкрашивания и вырывания абразивного зерна из связки инструмента, возникновения микроколебаний зерна в связке инструмента, изменения пористой структуры связки инструмента, микростружкообразования, пластического оттеснения и упрочнения обрабатываемого материала единичным зерном и совокупностью зерен и т. д.

Это достигается тем, что в рентгенопрофилографе активного контроля [4], содержащем источник рентгеновского излучения, кристаллический резонатор для получения монохроматического рентгеновского излучения, фокусирующее кристаллические системы – коллиматоры, принцип действия одного из которых основан на восьми лучевой дифракции, кристаллические зеркала, для разделения и изменения направления распространения рентгеновского излучения, регистрирующую среду – кристалл – анализатор для получения интерференции волн, увеличение трехмерной интерференционной картины осуществляется отражательным микроскопом при регистрации голографического изображения исследуемого объекта, а для измерений используется трехмерная матрица, составленная из электронно-оптических преобразователей.

4. Способы формирования микрорельефа

Методика прогнозирования новых способов обработки основана на теоретическом исследовании трехмерной геометрической модели обрабатываемой поверхности и

заключается в том, что на основе разработанной классификации обрабатываемой поверхности устанавливается бинарное соответствие формообразующей поверхности. По этому соответствию осуществляется прогнозирование новых способов формообразования.

Обрабатываемая поверхность представлена, как суперпозиция трехмерной геометрической модели с гладкой «сшивкой» модулей, которая дает представление о геометрии в целом и модели с не гладкой «сшивкой» модулей, которая содержит информацию о микрорельефе формообразующей поверхности.

Определены типы способов обработки.

Первый тип – способы, позволяющие теоретически точно воспроизвести геометрию обрабатываемой поверхности. В их основе лежит изменение характера контакта инструмента и заготовки. Способ шлифования пера лопатки газовой турбины сложно профильными инструментами, относится к первому типу. [5]

Второй тип – способы, позволяющие воспроизвести микрорельеф обрабатываемой поверхности в соответствии с заданными геометрическими характеристиками. В их основе лежит изменение схемы съема припуска. Способ шлифования инструментом из эльбора на связке из металлических нитей относится ко второму типу. [6]

Третий тип – способы, позволяющие воспроизвести теоретически точно геометрию обрабатываемой поверхности и ее микрорельеф в соответствии с заданными геометрическими характеристиками. В их основе лежит изменение микро геометрии инструмента в процессе обработки детали. Способ шлифования пера лопатки газовой турбины на гибкой связке в магнитном поле, относится к третьему типу. [7]

Для реализации прогнозируемого способа формирования микрорельефа, позволяющего воспроизвести его микро геометрию по заданным геометрическим характеристикам, требуется нестандартное оборудование – аналог ускорителя элементарных частиц – циклотрона.

В качестве инструмента используют абразивные частицы, находящиеся в магнитном поле. Аналитическое задание поверхности детали: пера лопатки газовой турбины используют для расчета общей гомовинтовой траектории перемещения абразивных частиц. Заряженным абразивным частицам, управляемым магнитным полем, сообщают относительно пера лопатки движение по общей гомовинтовой траектории, в соответствии с типом лопатки, изменения вида винтовой траектории абразивных частиц и замены фракции абразивных частиц.

5. Способ шлифования пера лопатки газовой турбины инструментом на гибкой связке в магнитном поле

Задачи, на которые направлено изобретение, состоят в объединении в один производственный цикл основных операций абразивной обработки пера лопатки газовой турбины, начиная от черновой и заканчивая суперфинишной в одной технологической системе, расширении номенклатуры типов обрабатываемых лопаток, повышении точности формообразования макро геометрии пера лопатки и управлении по заданным характеристикам: глубине шлифования, полю температур и тензора кривизны и т. д. процессом микро формообразования поверхностного слоя.

Поставленные задачи решаются предлагаемым способом шлифования, при котором на резонансном ускорителе – циклотроне заряженным абразивным частицам, управляемым магнитным полем, сообщают относительно детали, движение по общей гомовинтовой траектории из условий обеспечения комфортного изменения общей гомовинтовой формообразующей поверхности в соответствии с типом лопатки, изменения вида винтовой траектории абразивных частиц в соответствии с заданной формообразующей поверхностью, и возможности замены фракции абразивных зерен.

При этом перед обработкой рабочую (входную, выходную кромки, спинку, корыто) лопатки газовой турбины описывают аналитически на основе модульной геометрической

модели поверхности сложной формы, полученное аналитическое задание пера лопатки, используют для расчета общей гомовинтовой траектории абразивных частиц.

Выводы:

1. Разработан способ определения топографии микрорельефа, позволяющий построить трехмерную геометрическую модель микрорельефа по экспериментальным данным.

2. Дано обоснование возможности прогнозирования разработки приборов пассивного и активного неразрушающего контроля, позволяющих проводить оценку на основе трехмерных геометрических моделей.

3. Осуществлено прогнозирование разработки приборов пассивного и активного неразрушающего контроля над процессом формирования микрорельефа, принцип контроля которых основан на последних исследованиях процессов получения голографического изображения объекта в оптическом и рентгеновском диапазонах.

4. Дано обоснование возможности прогнозирования новых способов обработки, позволяющих формировать микрорельеф по заданным геометрическим характеристикам.

5. Даны рекомендации по прогнозированию способа формирования микрорельефа, позволяющего воспроизвести его микро геометрию по заданным геометрическим характеристикам, способа шлифования пера лопатки газовой турбины на гибкой связке в магнитном поле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Ю. С., Белкин Е. А., Барсуков Г. В. Моделирование микрорельефа абразивного инструмента и поверхности детали. Монография. М.: Изд-во «Машиностроение-1». 2004. 215 с. Патент РФ № 2229970. Способ получения абразивного инструмента из эльбора на связке из металлических нитей / Степанов Ю.С., Белкин Е.А., Барсуков Г.В. Заяв. 29.07,2002. Оpubл. 10.06.2004. Бюл. № 16.

2. Патент РФ № 2187070. Способ определения микрогеометрии поверхности детали и абразивного инструмента / Степанов Ю.С., Белкин Е.А., Барсуков Г.В. Заяв. 27.02.2001. Оpubл. 10.08.2002. Бюл. № 22.

3. Свидетельство № 2008612886, программа «Cad-Grinding». Белкин Е.А. Заяв. 25.12.2007. Зарегистрировано 11.06.2008.

4. Патент РФ №280204. Рентгенопрофилограф активного контроля / Белкин Е.А. Заяв. 24.10.2005. Оpubл. 12.02.2007. Бюл.№22

5. Патент РФ № 2217290. Способ шлифования пера лопатки газовой турбины сложнопрофильными инструментами / Степанов Ю.С., Белкин Е.А., Барсуков Г.В. Заяв. 26.03.2002. Оpubл. 27.11.2003. Бюл. № 33.

6. Патент РФ № 2229970. Способ получения абразивного инструмента из эльбора на связке из металлических нитей / Степанов Ю.С., Белкин Е.А., Барсуков Г.В. Заяв. 29.07,2002. Оpubл. 10.06.2004. Бюл. № 16.

7. Патент РФ № 2266188. Способ шлифования пера лопатки газовой турбины инструментом на гибкой связке в магнитном поле / Белкин Е.А. Заяв. 22.03.2004. Оpubл. 20.12.2005. Бюл.№35.

Евгений Александрович Белкин

Орловский областной институт
усовершенствования учителей,
заведующий лабораторией физики
тел. (4862)-552920

УДК 621.075.32

БОНДАРЬ А.В., ОМИГОВ Б.И., СМОЛЕНЦЕВ В.П., УВАРОВ М.А.

СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

На базе тенденций освоения в отрасли производства новой техники и её востребованности на мировых рынках показаны направления развития науки и практики в области отраслевой технологии, показана специфика работы специалистов - технологов в современных условиях.

Areas of the science and practice development in the field of the branch technology on the basis of mastering tendencies in the production sector of new equipment and its demand in the worlds' markets are shown; the work specificity of specialists-technologists under up-to-date conditions is described.

В общей структуре жизненного цикла изделия технолог решает главный вопрос производства: как выполнить в металле объект техники, заложенный конструктором. Последний ограничен в своих изысканиях возможностями используемой технологии, уровнем материальной базы и потенциалом кадров.

В авиационной и космической отрасли машиностроения к технологам предъявляются повышенные требования: гораздо более высокий уровень ответственности за соблюдение требований разработчика к качеству создаваемых изделий; потребность в новых технологических процессах для выпуска наукоемкой техники рассматриваемой отрасли. При этом с каждым годом новые изделия становятся все более сложными. Это видно из анализа созданных и создаваемых летательных аппаратов.

В самолетостроении идут по пути создания тяжелых летательных аппаратов. Так в России вместо ИЛ-96-300 начали выпуск более крупного самолета ИЛ 96-400; в Европе и США освоено производство аэробусов на 500 и более пассажирских мест.

В военной авиации осваивается серийный выпуск самолетов 5 поколения с новой авионикой и двигателями, с изменяемым вектором тяги. Сформировалось новое направление: создание беспилотных машин, где вместо разведывательных летательных аппаратов типа «Пчелка» (близки к управляемым моделям), появились беспилотные истребители, бомбардировщики. Здесь процессом полета и воздушного боя может управлять оператор с земли, т.е. из безопасного места.

В вертолетостроении работа ведется в направлении создания машин легкого класса типа Ми-2 для индивидуальных деловых полетов; разработки и освоения новых боевых машин типа «Аллигатор», «Черная акула», «Ми-28», иностранных изделий (в частности конструкции Сикорского), которые позволяют развить скорость до 400 км/час, а в перспективе – до 450 км/час, они оснащены современными средствами управления, вооружением.

В космической отрасли намечено создание недорогого космического аппарата типа «Клипер» для платных полетов в космос туристов; разработка и освоение новых космических систем типа «Ангара», «Русь», пригодных для многоцелевого использования.

Уровень и конкурентоспособность этих изделий зависит от возможностей реализации технологом созданной конструкции, особенно на стадии освоения продукции в производстве.

В работе технолога отрасли имеются существенные отличия от других отраслей. Так если наземные машины в процессе эксплуатации можно остановить, отремонтировать, то для летательных аппаратов такие возможности ограничены, а для космических - практически исключены.

Это требует обеспечения в летательных аппаратах высокого уровня надежности [1],[2], реализуемого технологическими службами предприятий. Живучесть изделий

авиационной техники зависит от двигателей, при изготовлении которых возникает наибольшее количество сложных технологических проблем. И хотя стоимость двигателей не превышает 25% от стоимости всего изделия, к нему предъявляются особые требования по качеству и надежности, большинство которых выполняется технологом в процессе изготовления изделия. Одной из задач, решаемых технологом, является назначение обоснованных показателей уровня качества и надежности

Из теории известно, что повышение надежности специзделий в 2 раза вызывает повышение стоимости их изготовления примерно в 4 раза, т.е. наблюдается квадратичная зависимость по росту затрат на создаваемую продукцию, поэтому в условиях внутриотраслевой конкуренции госзаказы на новые изделия будет иметь тот завод, который предложит более выгодные условия изготовления продукции. А это в первую очередь зависит от уровня технологических разработок и соблюдения технологической дисциплины.

Для летательных аппаратов требуется совместить высокую прочность и надежность (при низкой себестоимости) с минимальной массой. Задача решается не только технологами, но и металлургами (создание и освоение новых материалов и др.). Перед технологами стоит задача получения качественных сложных по геометрии деталей из новых (как правило, труднообрабатываемых механически) материалов. Отсюда вытекают новые задачи в области технологии: разработка оригинальных (например, комбинированных) методов обработки путем синтеза механических, химических, тепловых, магнитных, ядерных воздействий. На рисунке 1 показаны известные комбинированные методы, осуществляемые с наложением электрического поля. Эти методы успешно развивались в СССР до перестройки и мы были здесь лидерами. Но теперь их развитие замедлилось и они остались только в оборонных отраслях, где без таких процессов невозможно обойтись. Анализ показывает, что соединением различных воздействий возможно создание и освоение более 800 видов комбинированной обработки с наложением электрического поля (рисунок 1). В настоящее время в промышленности применяют не более 15-20 таких технологий. Здесь заложен мощный резерв для развития отраслевой (да и общей) технологии в машиностроении.



Рисунок 1 - Воздействия при КМО

Дальнейшее развитие новых технологических процессов требует наличия современного оборудования, которое в настоящее время в России практически не разрабатывается и не выпускается. Отсутствуют головные разработчики, потеряли потенциал отраслевые станкостроители.

Продукция авиакосмической отрасли мелкосерийная. Для нее характерно гибкоструктурное производство, требующее большого количества средств технологического оснащения. В настоящее время производством таких средств вынуждены заниматься предприятия отрасли. Так в ДГТУ разработана новая система проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ [3], [4].

Известно, что на предприятиях имеется большой парк станков с ЧПУ, у которых невысокая загрузка из-за устаревшей системы внешнего управления (они не обеспечивают нужной точности и качества поверхностного слоя ажурных деталей), поскольку учитывают лишь малое число адаптивных воздействий, работают не в реальном масштабе времени, т.е. запаздывают с командами на изменение режимов обработки. Поэтому приходится дорабатывать детали, что экономически не выгодно и снижает их качество, ухудшает весовые характеристики. Сейчас Россия идет по пути закупки зарубежного оборудования. При этом страна вынуждена фиксировать развитие зарубежного станкостроения. Поставляемые в Россию станки рассчитаны на выпуск только типовых изделий. В них место технолога заняла автоматика. Достаточно ввести исходные данные по запросам системы и будет сделана деталь. Однако в таком оборудовании совершенно не учитывается специфика отрасли. А любая попытка что-то учесть и изменить в программе приводит к выходу станка из строя. Приходится оплачивать дорогостоящий ремонт, а наладчики предупреждают, что повторное вмешательство в работу управления станка сделает его не ремонтнопригодным. В заложенных («вшитых») программах оборудования использованы явно заниженные технологические показатели, что при использовании таких станков делает нашу отечественную продукцию неконкурентоспособной. В большей степени это относится к авиационной и космической отрасли, где Россия пока имеет технические приоритеты.

В ДГТУ на примере крупного вертолетного завода освоена новая система технологической подготовки станков с ЧПУ, которая нашла также использование на многих заводах. В системе используются современные средства адаптации по многим показателям, а поскольку это происходит быстро, то уточненные команды поступают в реальном масштабе времени. Таким образом станки с ЧПУ постоянно работают в оптимальном режиме.

Система [3] включает адаптацию параметров процесса по внешним и внутренним воздействиям. В [4] приведена часть созданного оригинального оборудования с ЧПУ, где за счет новой системы управления резко повышены точность и качество обработки на имеющихся станках, практически исключена доработка деталей после станочных операций. В результате нашли эффективное использование отечественные станки и коэффициент их загрузки вырос в 2-2,5 раза. Такие работы должны стать приоритетными в технологии.

За прошедшие 15 лет сильно изменился (и не в лучшую сторону) состав оборудования. В процессе конверсии многие станки были списаны, т.к. у заводов отрасли не было средств на их содержание, а госзаказ на спецтехнику в эти годы снизился с 70-80% до 25-30% и станки оказались не нужными. Кроме того наблюдалась необдуманная загрузка сложного оборудования случайными работами.

Новые станки практически не закупались десятилетиями (рисунок 2). Если в прошлом станочный парк оборонных заводов обновлялся на 5-10%, то за предшествующее десятилетие новых станков практически не закупалось и шло стремительное возрастное, моральное и физическое ухудшение структуры материальной части технологического

оснащения. Это негативно сказывается на технологических возможностях производства по созданию и выпуску современной техники с высоким качеством.

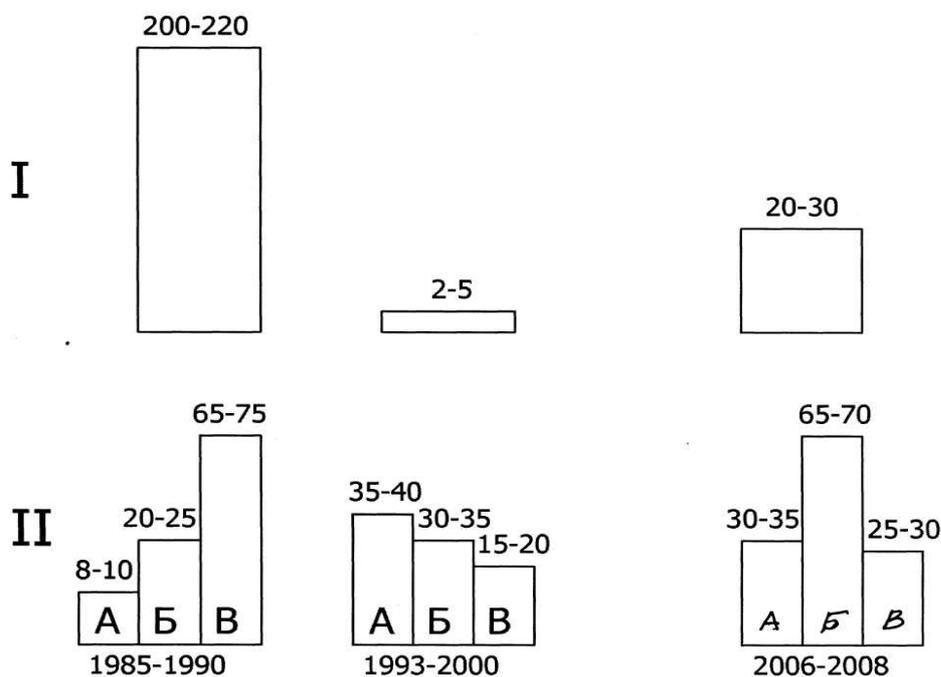


Рисунок 2 - Динамика обновления и состояния оборудования

I – количество ежегодно обновляемых единиц оборудования

II – возраст оборудования (% от общего)

A – свыше 20 лет; B – 5-20 лет; V – до 5 лет

В настоящее время заводам отрасли выделяют до 1000 миллионов рублей на переоснащение производства. На это можно приобрести не более 30 станков в год, что не компенсирует даже естественную убыль оборудования.

Главная вина за сложившееся положение в оборонных отраслях лежит на государстве, которое годами создавало узконаправленные производства, затем более 10 лет практически их не финансировало, поэтому теперь нужны большие средства (на порядок больше выделяемых) для восстановления отрасли. Не нужно забывать, что авиация и космонавтика – одно из немногих направлений машиностроения, где Россия имеет приоритеты и базу для решения государственной задачи по выходу на международные рынки с конкурентоспособной наукоемкой продукцией.

В формировании технологической политики в отрасли многое зависит от созданной в последнее время ассоциации технологов России. Она должна активно участвовать в разработке государственной программы по развитию отечественного станкостроения с учетом специфики отраслей. Если этого вовремя не сделать Россия вынуждена будет финансировать зарубежные станкостроительные фирмы, ограничивая материальные возможности по реконструкции предприятий отрасли.

Расчеты показывают, что своевременные крупные вложения в развитие станкостроения окупятся достаточно быстро, если не затягивать решение вопроса (по нашим расчетам окупаемость вложений не превышает 3-4 лет).

Необходимо определить головные организации, определяющие политику в станкостроении. У ведущих отраслевых научных технологических центров (НИАТ в авиации и НИИТ (Техномаш) в космической технике) утрачен потенциал (малочисленность, мало средств, современного оснащения, нет нужных кадров).

При разработке государственных программ в области станкостроения и новых технологий, целесообразно опираться на научный потенциал ВУЗов, где пока есть высококвалифицированные технологии. А координацию работ целесообразно поручить ассоциации технологов России, для чего в ее структуре предусмотреть сеть региональных отделений, а руководству ассоциации установить связи с министерствами и федеральными агентствами. Без участия технологов (в том числе ученых) разрабатываемые правительством программы могут оказаться не продуманными и затраты на их осуществление не окупятся. В частности не будет полностью учтена специфика отраслей, для которых необходимо финансирование на восстановление станкостроения с учетом технологических требований к продукции авиации и космонавтики.

Одновременно требуется развить информационные системы. Если бы в конце восьмидесятых годов предприятия имели современные информационные системы, то многие (в основном закрытые) технологии не были бы утрачены или раскрыты.

Трудно решаемым вопросом остается комплектация кадров для отрасли. За период упадка в отрасли возникла возрастная проблема: потеря опытных пожилых специалистов без адекватной замены молодежью, резкое снижение престижа рабочих профессий, перекоса в подготовке специалистов в сторону гуманитарных профессий, где вся материальная база строится на доступной вычислительной технике. Трудно утверждать, что вводимая в стране многоуровневая система подготовки специалистов удачна для современного машиностроения и, особенно, для авиационно-космической отрасли. Опыт прошлых десятилетий, когда мы имели очень ограниченную информацию из-за рубежа, показал, что ведущие вузы страны (а их было: авиационных не более 6-7, космических не более 3-4) самостоятельно способны обеспечить отрасли хорошими специалистами. Это подтверждено успехами страны в прошлые годы в области космонавтики и авиации.

Активная реконструкция предприятий отрасли позволяет надеяться на сохранение приоритетов отрасли и расширение рынка сбыта отечественных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарь А.В. Качество и надежность. М.: Машиностроение, 2007 – 308 с.
2. Мельников В.П. Управление качеством / В.П. Мельников, В.П. Смоленцев, А.Г. Схиртладзе // М.: Академия, 2006. – 352 с.
3. Флек М.Б. Управление формообразующими траекториями на станках с ЧПУ. Теория и практика // Ростов н/д: ДГТУ, 2005.– 160 с.
4. Флек М.Б. Технологичность и технология механической обработки деталей вертолетов на станках с ЧПУ // Ростов н/д: Терра, 2004. – 224 с.

А.В.Бондарь

Генеральный директор Воронежского механического завода
Заместитель генерального директора ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»

Б.И. Омигов

Заместитель генерального директора Воронежского механического завода

В.П.Смоленцев

Научный руководитель Воронежского механического завода
Доктор технических наук, профессор

М.А. Уваров

Инженер Воронежского механического завода

УДК 658.62.018.012

ИНОЗЕМЦЕВ А.Н., АНЦЕВ А.В.

КВАЛИМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАШИНЫ

Представлена система информационной поддержки управления качеством технологического проектирования при производстве машиностроительной продукции на основе квалиметрической оценки технологического проекта изготовления машины по комплексной шкале измерения потребительского восприятия качества сервиса.

An information support system for manufacturing planning's quality management in engineering production is presented based on a qualimetric evaluation of machine's manufacturing project using a complex scale for measuring the consumer's perception of service quality.

Современное состояние проблемы управления качеством промышленной продукции характеризуется острой необходимостью совершенствования методов квалиметрической оценки процессов ее конструкторско-технологического проектирования и освоения производства, так как именно на этих этапах жизненного цикла (ЖЦ) продукции допускаются наибольшее число ошибок, приводящих к большим затратам.

При разработке методов информационной поддержки процессов конструкторско-технологической подготовки производства установлено, что проектные решения и технологические документы, отражающие результаты технологического проектирования, целесообразно объединять в единый иерархически структурированный информационный объект – технологический проект машины (ТПр), который динамически развивается вместе с проектом машины и детально описывает технологический аспект производственного процесса ее изготовления [3]. Причем, так как на различных этапах жизненного цикла машины решаются и соответствующие им различные задачи технологического проектирования, то результаты решения данных задач надлежащим образом отражаются в ТПр. Это обстоятельство позволяет говорить и о жизненном цикле технологического проекта, который состоит из девяти этапов [3]:

- 1) оценка полезности изготовления машины на основе укрупненных расчетов норм времени и расхода материалов;
- 2) разработка специфицированных проектных решений;
- 3) разработка проектных решений по межцеховой маршрутизации и формированию машинокомплектов;
- 4) разработка индивидуальных проектных решений по различным технологическим переделам;
- 5) выпуск технологической документации;
- 6) применение технологической документации;
- 7) изменение, пересмотр, ревизия технологической документации;
- 8) учет и хранение технологической документации;
- 9) отмена (замена) технологической документации.

С целью обеспечения возможности управления качеством технологического проектирования по циклу развития DMAIC (Define-Measurement-Analyze-Improve-Control – Определение-Измерение-Анализ-Улучшение-Контроль), составляющего основу методологии совершенствования процессов «шесть сигм» и находящего в настоящее время очень широкое распространение в различных областях промышленности [4], разработана методика квалиметрической оценки технологического проекта изготовления машины на различных этапах его жизненного цикла по методу сервисного качества ServQual (a multi-item scale for measuring consumer perceptions of service quality – комплексная шкала для измерения потребительского восприятия качества сервиса), который базируется на применении

системного и процессного подходов и использует механизмы оценки удовлетворенности потребителей и определения эффективности корректирующих и предупреждающих мероприятий [2]. Метод ServQual включает развитие понимания воспринимаемых потребностей целевых потребителей. Эти измеряемые восприятия качества сервисных услуг организации далее сравниваются с организацией-эталонном. Получаемый анализ разрыва может после этого быть использован как движущий фактор для повышения качества сервисных услуг.

Основой, кратко отражающей суть концепции, является алгоритм «Ожидание минус Восприятие» (Expectation – Perception, $E-P$). Восприятие в методике рассматривается как замеренное потребительское отношение к реально созданному и воспринимаемому товару в рамках пробного маркетинга.

Метод ServQual учитывает восприятия клиентов в отношении относительной значимости параметров сервисных услуг. Это позволяет организации правильно расставлять приоритеты и использовать свои ресурсы для улучшения самых важных параметров.

Базовый алгоритм, выявляющий «степень качества товара» и наиболее полно отражающий концепцию ServQual, описывается следующим уравнением:

$$SQ_i = \sum_{j=1}^k W_j \cdot (E_{ij} - P_{ij}),$$

где SQ_i – воспринимаемое качество компонента i ; k – количество анализируемых атрибутов; W_j – весовой фактор атрибута; P_{ij} – созданное восприятие компонента i по отношению к атрибуту j ; E_{ij} – ожидаемый уровень для атрибута j , который является нормативом компонента i .

В данной работе выполнена интерпретация модели сервисного качества к оценке качества реализации различных этапов жизненного цикла технологического проекта изготовления машины, интегрирующего проектные решения и технологические документы, отражающие результаты технологической подготовки производства. При этом модель сервисного качества представлена как поэтапный алгоритм, позволяющий реализовать все вышеперечисленные возможности базовой модели.

Укрупненный алгоритм квалиметрической оценки ТПр на различных этапах его жизненного цикла представлен на рис. 1.

Феномен удовлетворенности потребителя неоднозначен и складывается из различных критериев, поэтому метод, построенный на базе модели ServQual, в первую очередь, подразумевает их определение, которое производится экспертами в соответствующих предметных областях на основе опыта позиционирования и/или исследования базовых потребительских тенденций. Рекомендуются формирование компонентов в количестве от 5 до 9, поскольку меньшее количество компонентов не выразит сущности потребностей, удовлетворяемых соответствующим этапом ЖЦ ТПр, а большее количество заведомо избыточно и размывает сущность данного этапа. Определение наиболее важных критериев осуществляется через процедуру ранжирования – присвоение каждому из критериев какого-либо места (ранга). Присвоение ранга можно осуществить двумя способами: ранжированием средних оценок по каждому из критериев; ранжированием индекса «важности»/«удовлетворенности». Оптимальным для квалиметрической оценки результатов технологического проектирования является второй случай.

Результаты исследования качества с помощью метода ServQual интерпретируются следующим образом:

- нулевое значение какого-либо из коэффициентов качества означает совпадение уровня ожидания качества и уровня восприятия качества по этому критерию;
- негативные значения указывают на то, что восприятие качества выше уровня ожиданий;

– положительные значения указывают на то, что уровень ожиданий превышает уровень восприятия.

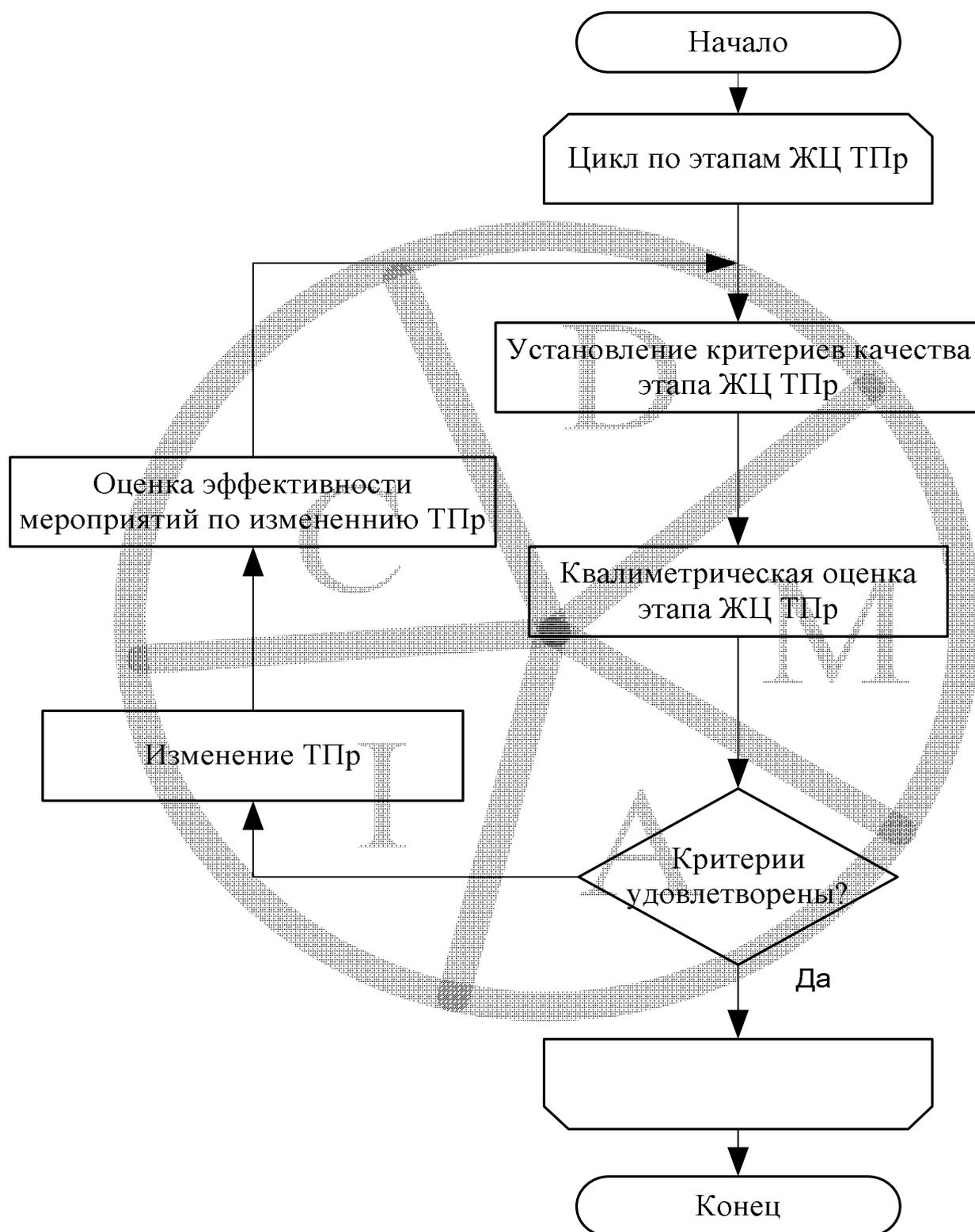


Рисунок 1 - Квалиметрической оценки технологического проекта

В соответствии с разработанной моделью, если значение удовлетворенности этапом ЖЦ ТПр меньше, чем значение ожидания, то необходима корректировка критерия. Для определения критерия, требующего наибольшего внимания при корректировке, выделяют

критерии с максимальным значением ожидания минус восприятие и максимальным значением весового коэффициента.

Коэффициент необходимости (или приоритетности) корректирования критерия этапа ЖЦ ТПр K_{Cj} предложено определять следующим образом [1]:

$$K_{Cj} = 100 \cdot W_j \cdot \left(\frac{E_j}{P_j} - 1 \right),$$

где W_j – весовой фактор атрибута; P_j – созданное восприятие атрибута j ; E_j – ожидаемый уровень для атрибута j . Увеличение коэффициента необходимости корректировки критерия в 100 раз необходимо для получения более наглядных результатов.

При создании формулы для расчета «коэффициента необходимости корректирования» в качестве исходных предпосылок было взято два утверждения, логично проистекающих из сути предложенного метода:

- чем больше вес критерия, тем больше необходимость его корректирования;
- чем больше уровень ожиданий превышает уровень восприятия, тем больше необходимость корректирования критерия.

С целью автоматизации процесса квалиметрической оценки технологического проекта с использованием модели ServQual в соответствии с представленной методикой создана соответствующая система информационной поддержки. Её использование обеспечивает единый подход к оценке полезности проектных решений, предусматривающий эффективное согласование действий всех профессиональных групп, участвующих в проектировании, производстве и обеспечении качества продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анцев А.В. Квалиметрическая оценка технологического проекта изготовления машины // Известия Тульского государственного университета. Серия Экономика. Управление. Стандартизация. Качество. Вып. 5. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 89 – 98.
2. Багиев Г.Л. Основы проведения маркетинговых исследований / Г.Л. Багиев, А.А. Алексеев. – М: ВШЭ, 2003. – 58 с.
3. Иноземцев А.Н., Анцев А.В. Управление качеством технологического проекта изготовления машины // Известия Тульского государственного университета. Серия Технологическая системотехника. Вып. 9. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 107 – 119.
4. Конти Т. Качество в XXI веке. Роль качества в обеспечении конкурентоспособности и устойчивого развития / Под ред. Т. Конти, Ё. Кондо, Г. Ватсона / Пер. с англ. А. Раскина. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2005. – 280 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

А.Н. Иноземцев,

Доктор технических наук, профессор
Тульский государственный университет
Тула, тел./fax (4872)351887

А.В. Анцев,

Тульский государственный университет
Тула, тел./fax (4872)351887, E-mail: anzev@uic.tula.ru

УДК 621.99

А.В. КИРИЧЕК, А.Н. АФОНИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрена методика моделирования нарезания резьб с помощью метода конечных элементов в системе DEFORM. Приведены конкретные примеры моделирования. Сделан вывод о перспективности применения современных систем автоматизированного проектирования для проектирования технологических процессов резьбонарезания.

The technique of modelling thread cutting by means of a finite elements method in system DEFORM is considered. Concrete examples of modelling are resulted. It is drawn a conclusion on perspectivity of application of modern systems of the automated designing for designing technological processes thread cutting.

Лезвийная обработка резанием на сегодняшний день является наиболее распространенным способом получения резьб в машиностроении. К ней относятся такие широко распространенные технологические процессы, как нарезание резьб резцами, плашками, метчиками, гребенками, резьбовыми фрезами и т.д. Процессы нарезания винтовых поверхностей являются одними из наиболее сложных среди процессов обработки резанием. В силу сложного характера явлений, происходящих при нарезании резьб, общая теория данного процесса на сегодняшний день отсутствует. Современные методики проектирования технологии резьбонарезания являются эмпирическими. В связи с этим, разработка новых технологических процессов резьбонарезания требует проведения большого объема экспериментальных исследований. Избежать этого можно применением систем автоматизированного моделирования технологических процессов обработки давлением и резанием, основанных на методе конечных элементов (МКЭ).

Произведенный анализ таких универсальных и специализированных систем инженерного анализа, основанных на МКЭ, как LS-DYNA, MSC.Marc, QForm, MSC.SuperForm, MSC.SuperForge, DEFORM, показал, что на сегодняшний день наиболее адекватно смоделировать такой сложный трехмерный процесс деформирования и разрушения материалов, как резьбонарезание, может программный пакет DEFORM. DEFORM, разработанный компанией Scientific Forming Technologies Corporation (США), является одним из мировых лидеров в области моделирования пластической деформации и разрушения материалов. DEFORM позволяет моделировать с высокой степенью достоверности сложные процессы деформирования тел, в том числе ротационные, с локальным нагружением заготовки, в двух- и трехмерной постановке задачи. В настоящее время DEFORM является одним из немногих программных продуктов, позволяющих моделировать сложные процессы лезвийной обработки, сопровождающиеся снятием с заготовки стружки.

Использованию DEFORM для моделирования процессов обработки давлением, в частности накатывания резьб, посвящено достаточно большое количество работ, например [2, 4]. Возможностям пакета по исследованию процессов обработки резанием уделялось значительно меньше внимания.

Наиболее простым по схеме резания является нарезание резьб резцом. Рассмотрим в качестве примера моделирование в пакете DEFORM нарезания наружной резьбы М20х2 резцом на заготовке из стали 45. Поскольку при резьбоформообразовании имеет место сложное, объемное напряженно-деформированное состояние заготовки, при вычислительном эксперименте целесообразно использовать модуль трехмерного моделирования DEFORM 3D. DEFORM 3D имеет специальный помощник – шаблон, позволяющий упростить задание начальных и граничных условий при моделировании таких процессов обработки резанием, как строгание, точение, сверление, фрезерование. Однако, для

моделирования более сложных процессов, например нарезания резьбы, необходимо воспользоваться универсальным препроцессором, обладающим большими возможностями для варьирования начальных и граничных условий.

Для сокращения времени расчета моделирование резьбонарезания производилось только для одной четверти заготовки. На месте удаленных частей заготовки прикладываются компенсирующие их граничные условия: запрет на перемещения по оси, перпендикулярной к плоскости разреза. Резьба представлялась в виде двух кольцевых канавок. 3D модель заготовки создавалась с помощью препроцессора DEFORM. 3D модель инструмента была создана в формате файлов для стереолитографии (*.stl) в отечественной системе трехмерного моделирования T-Flex CAD 3D.

Особенностью моделирования различных процессов с помощью МКЭ в современных САЕ-системах является необходимость сохранения телом, разбитым на конечные элементы (в данном случае заготовкой), неподвижности, все движения обработки следует прикладывать к инструменту. При моделировании нарезания резьбы резцом к инструменту прикладывалось вращательное движение вокруг оси заготовки, имитирующее вращение заготовки вокруг своей оси со скоростью 100 рад/с.

Поскольку упругая составляющая деформации заготовки при резании составляет не более 0,1%, заготовка для ускорения времени расчета принимается жестко-пластичной. Инструмент при расчете полей напряжений и деформаций в заготовке принимается идеально жестким. Подобные упрощения не вносят существенной погрешности в результаты расчета. Механические свойства материала заготовки и инструмента задавались путем выбора соответствующей стали из имеющихся в программном комплексе библиотек материалов. Коэффициент трения между инструментом и заготовкой принимался равным 0,38 [3]. Для учета при моделировании взаимодействия стружки с заготовкой необходимо задать возможность возникновения контакта заготовка-заготовка. Моделировалась обработка без применения смазочно-охлаждающих технологических сред.

В качестве критерия разрушения был принят используемый в DEFORM по умолчанию критерий разрушения Коккрафта-Лейтема (Cocraft-Lathem), поскольку он достаточно адекватно описывает разрушение поликристаллических металлов. Численное значение критерия разрушения было принято равным 0,64 [1].

Переразбиение конечноэлементной сетки по мере деформирования заготовки системой DEFORM производится автоматически. Условия переразбиения задавались таким образом, чтобы наиболее мелкие элементы были в местах наибольшей деформации, что повышает точность расчетов.

Нарезание резьбы шагом 2 мм резцом производится в несколько проходов. При этом существуют две основные схемы снятия припуска: с радиальным и с боковым врезанием резца [3]. Радиальное врезание обеспечивает высокую точность профиля и равномерный износ пластины. Боковое врезание уменьшает силы резания и улучшает условия для теплоотвода.

На рис. 1, 2 приведены поля эквивалентных напряжений и деформаций по Мизесу в заготовке, полученные в результате моделирования в DEFORM 3D двух первых проходов с различными схемами срезания припуска.

Следует отметить, что благодаря возможностям пакета DEFORM 3D по моделированию многооперационной обработки, для моделированию второго прохода использовалась заготовка, полученная после моделирования первого прохода, с сохранением результатов деформации, что позволило учесть технологическую наследственность.

Полученные в результате моделирования поля эквивалентных напряжений и деформаций хорошо совпадают с известными экспериментальными данными [3].

На рис. 3 приведены полученные в результате моделирования значения составляющих силы резания. Результаты моделирования также хорошо совпадают с результатами экспериментальных исследований [3]. В частности, видны более благоприятные условия резания при боковом врезании резца.

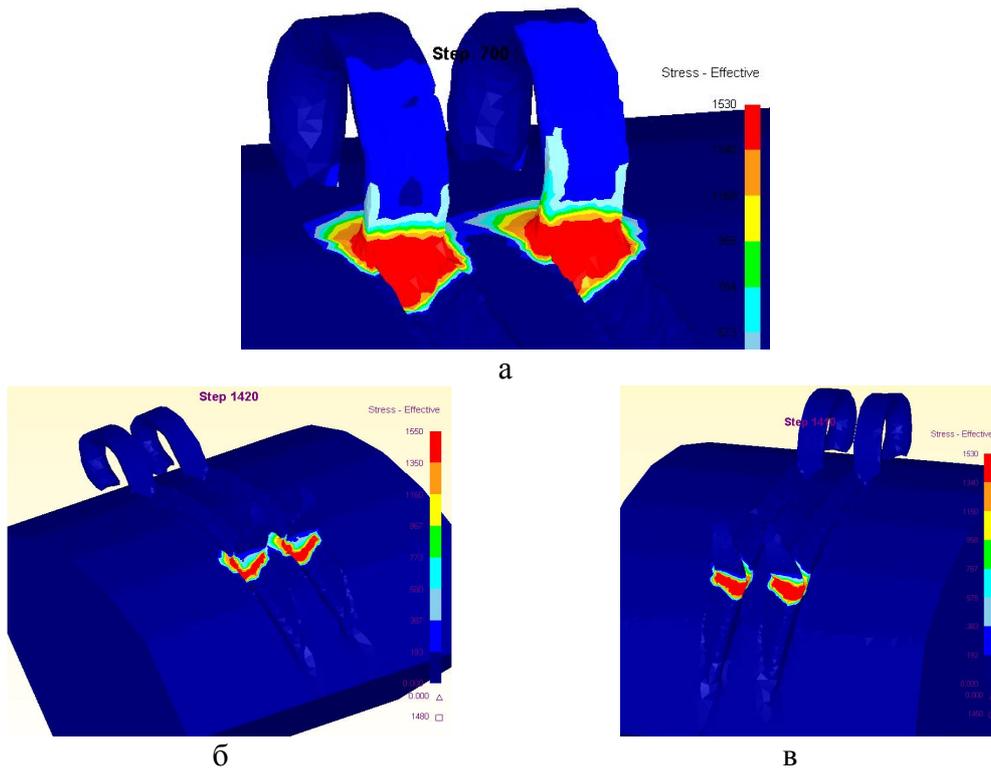


Рисунок 1 - Эквивалентные напряжения (МПа) в заготовке при нарезании резьбы M20x2
 а - первый проход; б – второй проход (радиальное врезание);
 в - второй проход (боковое врезание).

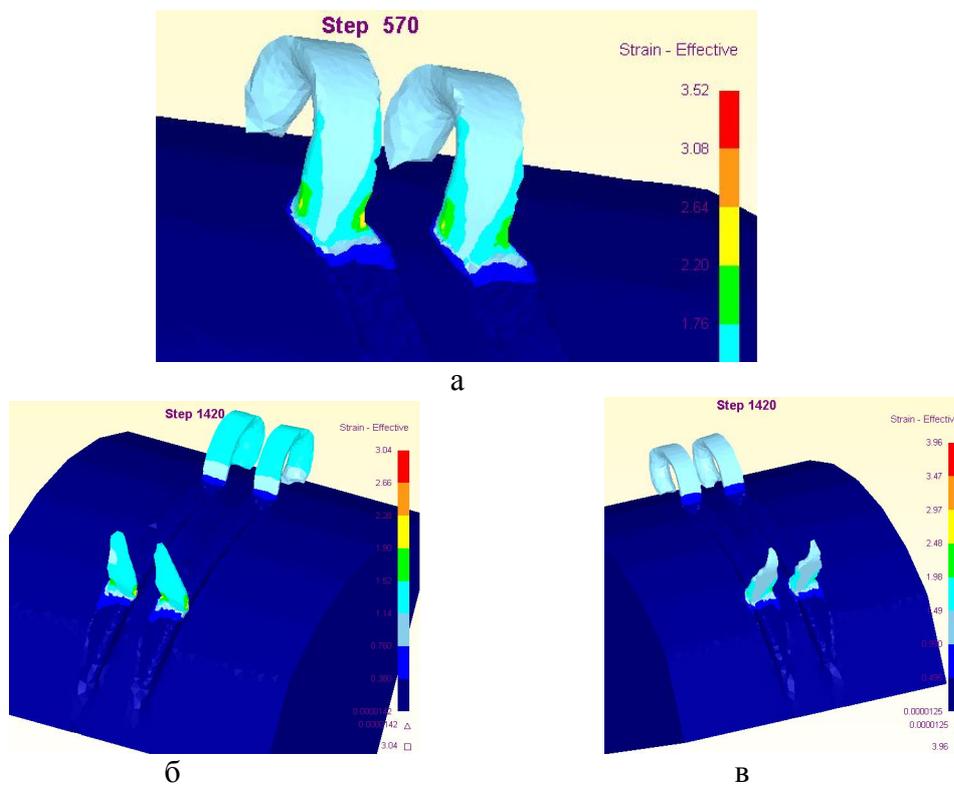


Рисунок 2 - Эквивалентные деформации в заготовке при нарезании резьбы M20x2
 а - первый проход; б – второй проход (радиальное врезание);
 в - второй проход (боковое врезание).

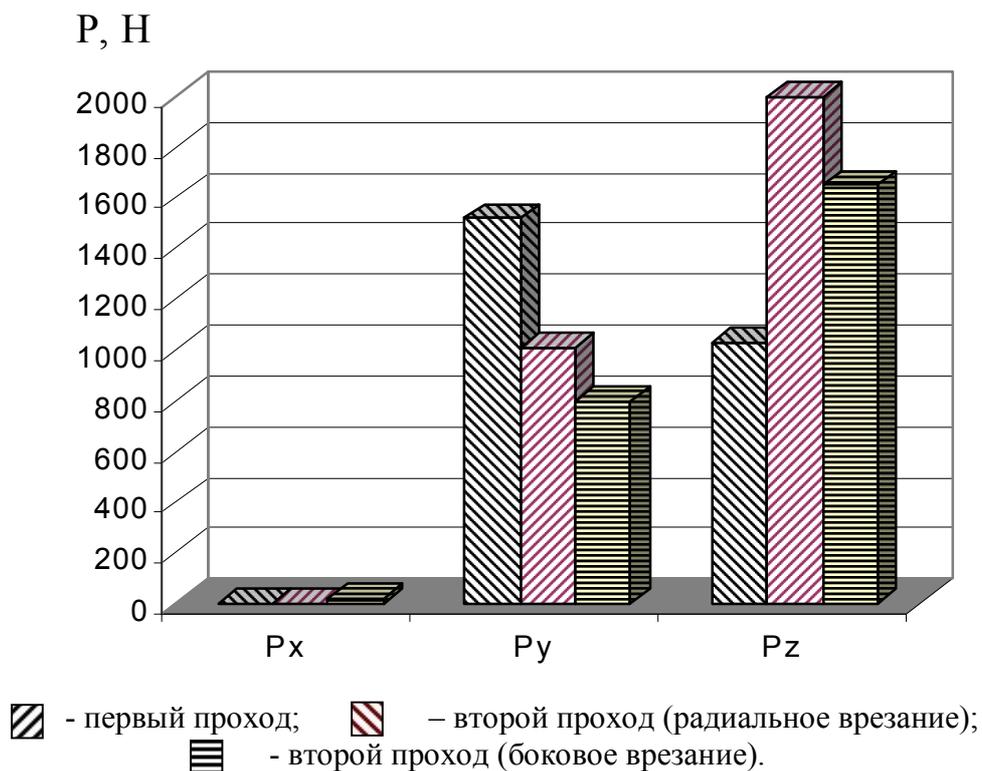


Рисунок 3. - Составляющие силы резания при нарезании резцом резьбы M20x2.

DEFORM 3D может успешно применяться и для моделирования более сложных процессов резьбонарезания, например нарезания внутренних резьб метчиком. Вычислительный эксперимент в DEFORM 3D позволит избежать необходимости проведения относительно трудоемких и дорогостоящих натуральных экспериментов и существенно сократить время на технологическую подготовку производства резьбовых изделий. Полученная с помощью DEFORM модель заготовки с нарезанной резьбой может быть также использована впоследствии, например, для прочностных расчетов, учитывающих технологическую наследственность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bonora, N. Identification and measurement of ductile damage parameters [Текст] / N. Bonora // Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 1999, №34(6). – P. 63-78.
2. Domblesky, J.P. Two-dimensional and three-dimensional finite element models of external thread rolling [Текст] / J.P. Domblesky, F. Feng // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B-Journal of Engineering Manufacture. v. 216, n 4, 2002. – P. 507-517.
3. Бобров, В.Ф. Многопроходное нарезание крепежных резьб резцом [Текст] / В.Ф. Бобров. - М.: Машиностроение, 1982. – 104 с.
4. Киричек, А.В. Исследование напряженно деформированного состояния резьбонакатного инструмента и заготовки методом конечных элементов [Текст] / А.В. Киричек, А.Н. Афонин // СТИН. - 2007, №7. – С. 21-25.

Андрей Викторович Киричек

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Д.т.н., проф., директор Технологического института ОрелГТУ
 Тел. 55-55-24; E-mail: ti@ostu.ru

Андрей Николаевич Афонин

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 К.т.н., доц., доцент каф. Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика
 ОрелГТУ
 Тел. 55-55-24; E-mail: af@au.ru

УДК 621.785

В. Н. ХРОМОВ, В. Н. КОРЕНЕВ, В. В. БАРАБАШ.

СПОСОБ И ГОРЕЛКА ДЛЯ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫМ ПЛАМЕНЕМ

Разработан способ и горелка для газопламенного напыления порошковых материалов, позволяющие уменьшить загрязнение окружающей среды и вредных выбросов в атмосферу, получить в качестве продукта сгорания водяного пара за счет использования в качестве горючего и транспортирующего газов экологически чистой водородно-кислородной смеси, вырабатываемой электролизерами из воды, предотвратить образование обратных ударов в горелке по каналу втулки.

The way and torch for flame spraying the powder materials is developed, allowing to reduce environmental contaminations and harmful emissions in an atmosphere, to receive as a product of combustion water pair due to use as fuel and transporting gases of a non-polluting hydrogen-oxygen mix, developed electrolyzers from water, to prevent formation of return impacts in a torch on the channel of the cartridge.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка относится к технике высокотемпературного напыления и может быть использована при газопламенном напылении порошковых покрытий, в частности, при работе на газах-заменителях ацетилена, преимущественно на водородно-кислородной смеси, вырабатываемой электролизерами из воды [1].

Известные методы рассчитаны на применение углеродсодержащих горючих газов, что загрязняет окружающую среду продуктами сгорания [2]. Кроме того, известные горелки не позволяют применять в качестве горючего газа водородно-кислородную смесь, так как она создает окислительное пламя. Применение в них в качестве транспортирующего газа водородно-кислородной смеси может привести к обратному удару в канале для газопорошковой смеси.

Для нанесения покрытий используется базовая порошковая газопламенная горелка фирмы «ТЕРМИКА» (рис. 1 и 2) «Искра-1». Технические характеристики применяемой горелки, указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики горелки «Искра-1»

Параметр	Значение
Производительность, кг/ч	до 10
Давление газов, МПа:	
ацетилена	0,07÷0,1
кислорода	0,40÷0,45
Расход газов, м ³ /ч (л/мин):	
ацетилена	0,6÷0,9 (10÷15)
кислорода	1,2÷1,4 (20÷23)
Грануляция порошкового материала, мкм	60÷100

Горелка «Искра-1» относится к классу горелок инжекторного типа. Горелка состоит из следующих основных деталей и узлов:

- корпус горелки;
- рукоятка горелки с пеналом для игл;
- защитный экран.

Газораспределительное устройство, включающее:

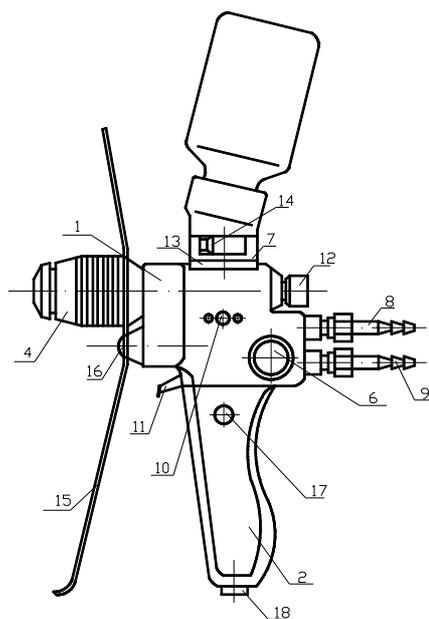
- быстросъемные мембранные клапаны;
- кран игольчатый ацетиленовый;
- стволовая насадка;
- штуцера для крепления гибких шлангов.

Устройство управления подачей порошкового материала:

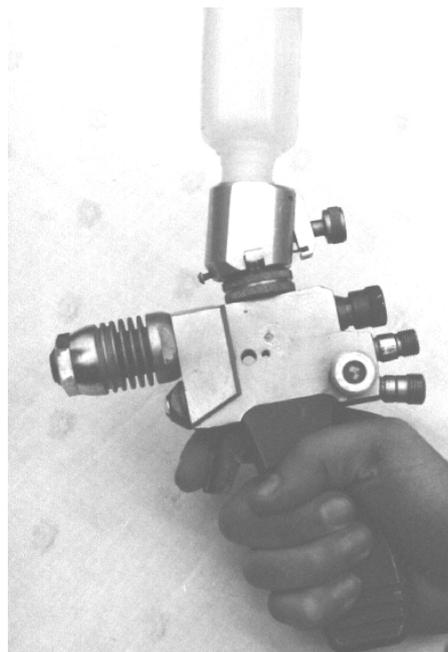
- кран игольчатый;
- быстросъемный порошковый клапан.



Рисунок 1 – Комплект дозующих горелок для газопламенного напыления и газопорошковой наплавки фирмы «ТЕРМИКА»



а) общий вид



б) фото

Рисунок 2 – Газопламенная горелка для порошкового напыления «Искра-1»:

1-корпус; 2- рукоятка; 4- стволовая насадка; 6- кран игольчатый ацетиленовый; 7- порошковый клапан; 8,9- штуцера; 10- посадочные отверстия; 11- рычаг; 12- игольчатый кран; 13- планка; 14- клапан; 15- экран; 16- винт; 17- винт; 18 – пенал с набором игл.

Корпус 1 горелки, схема которой приведена на рисунке 2, является базовой деталью, к которому присоединяются остальные узлы. В нем размещены инжектора по ацетилену и транспортирующему газу со смесительными камерами, системы газовых каналов и клапанов. Посадочные отверстия 10 на корпусе предназначены для крепления горелки посредством державок на различном оборудовании, используемом в качестве манипуляторов при производстве покрытий (например, токарно-винторезный станок).

Газораспределительное устройство служит для управления подачей газов – кислорода и ацетилена, включения и выключения горелки. В корпус горелки впаяны штуцера 8, 9 для крепления гибких шлангов.

Для оперативного перекрытия газовых магистралей служит мембранный клапан, размещенный в корпусе горелки. Рычаг (курок) 11 имеет два крайних положения – «открыто» от себя, «закрыто» на себя. В положении «открыто» под действием пружины мембрана отходит от седла клапана, что обеспечивает прохождение рабочих газов через клапан и систему газовых каналов горелки.

Игольчатый кран ацетиленовый 6 установлен в расточке, расположенной на левой боковой поверхности корпуса горелки, служит для управления расхода ацетилена.

Устройство управления подачей порошкового материала служит для включения, отключения и регулировки расхода порошкового материала. Оно включает порошковый клапан 7 с бункером, игольчатый кран 12. Клапан порошковый с бункером крепится к корпусу через планку 13 только в положении «красной метки» на лепестковом рычаге клапана 14.

«S» образный паз планки 13 и штифты клапана порошкового блокируют снятие бункера с открытым клапаном и предотвращают случайные просыпы порошкового материала.

При напылении потолочных поверхностей порошковый клапан с бункером устанавливаются с наклоном к сопловой части горелки, в остальных случаях – наклоном к рукоятке.

Игольчатый кран 12 по транспортирующему газу, установлен в расточке, расположенной на задней поверхности корпуса 1 и служит для управления расхода транспортирующего порошковый материал газа.

Для предотвращения перегрева бункера и защиты рук оператора от теплового излучения, на корпус горелки крепится экран 15 с помощью винта 16.

Задачей разработки является уменьшение загрязнения окружающей среды и вредных выбросов в атмосферу, получение в качестве продукта сгорания водяного пара, за счет использования в качестве горючего и транспортирующего газов экологически чистой водородно-кислородной смеси. Предотвращение обратного удара внутри горелки при использовании в качестве транспортирующего газа водородно-кислородной смеси, за счет выравнивания скоростей истечения газов из порошкового канала и выходных отверстий мундштука для горючего газа.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поставленная задача достигается тем, что в способе газопламенного напыления порошковых покрытий, включающем подачу порошка из сопла горелки в зону плавления с помощью транспортирующего газа, оплавление порошка под действием струи горючих газов, напыление на поверхность покрытия, согласно разработке, в качестве транспортирующего газа и горючих газов используют водородно-кислородную смесь, вырабатываемую электролизом из воды, при этом регулирование пламени нормального характера струи горючих газов осуществляют дополнительной подачей к водородно-кислородной смеси углеродсодержащих газов, например, пропан-бутана [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Горелка для газопламенного напыления порошковых покрытий, содержит корпус с расположенными каналами для подачи водородно-кислородной смеси и углеродсодержащего газа, например пропан-бутана, закрепленный на выходном конце корпуса сопловой наконечник, содержащий мундштук с центральным соплом и расположенными вокруг него по окружности сопловыми отверстиями, втулку, смонтированную в мундштуке соосно с центральным соплом, кран для регулирования расхода транспортирующего газа, снабжена стволовой насадкой, на которой закреплен мундштук, втулкой с каналом, смонтированной в мундштуке соосно с центральным соплом, и краном для регулирования расхода транспортирующего газа, при этом канал во втулке

выполнен в виде цилиндрического отверстия с фаской, которое переходит в конусносужающуюся часть, продолжением которой является цилиндрический участок, причем площадь выходного отверстия канала втулки равна $0,5-1,3$ суммарной площади выходных отверстий мундштука, то есть $\pi(d)^2/4 = (0,5\div 1,3)n\pi(d_1)^2/4$, а длины частей порошкового канала имеет следующие размеры:

$$\begin{aligned} L &= (4\div 6)d; \\ L_1 &= (7\div 10)d; \\ L_2 &= (0,5\div 0,6)D; \end{aligned}$$

где d – диаметр выходного отверстия втулки порошкового канала;

D - диаметр входного отверстия втулки порошкового канала;

L – длина цилиндрического участка выходного отверстия втулки порошкового канала;

L_1 – длина конусосужающейся части отверстия втулки порошкового канала;

L_2 – длина цилиндрического отверстия с фаской входного отверстия втулки порошкового канала;

$\pi(d_{п.к.})^2/4$ – площадь выходного отверстия втулки порошкового канала;

$n\pi(d_{г.г.})^2/4$ - суммарная площадь выходных отверстий мундштука для горючего газа; где n – количество отверстий; d_1 - диаметр выходного отверстия мундштука.

Когда $D = d$ и $\pi(d)^2/4 > 1,3n\pi(d_1)^2/4$, то наблюдается обратный удар в горелке через порошковый канал для транспортирующего газа. Если же d значительно меньше D и $\pi(d)^2/4 < 0,5n\pi(d_1)^2/4$, то снижается производительность горелки по параметру подачи порошка.

Предлагаемые геометрические параметры соплового наконечника горелки позволяют избежать обратного удара по порошковому каналу, повысить качество покрытий за счет увеличения теплоемкости пламени горения.

Горелка (рис. 2) содержит корпус 1 с каналом 2 для подачи углеродсодержащего газа, например пропан-бутана, каналом 3 для водородно-кислородной смеси, вырабатываемой электролизером из воды, и каналом 4 для транспортирующего газа, в качестве которого используют водородно-кислородную смесь. В качестве горючего и транспортирующего газов используют водородно-кислородную смесь, которую подают через ниппель 5 в канал 3 и 4. В канале 2 подачи углеродсодержащего газа, например пропан-бутана, и канале 3 подачи водородно-кислородной смеси, вырабатываемой электролизером из воды, установлены запорные клапаны 6 и 7, которые управляются рычагом 8, поворачивающимся вокруг оси 9 и имеющим рабочие поверхности 10 и 11, соответственно воздействующие на управляющий элемент 12 запорного клапана 6 и управляющий элемент 13 запорного клапана 7. Рабочие поверхности 10 и 11 выполнены таким образом, что при выключении сначала закрывается клапан 6, а затем клапан 7, в то время как при включении первым открывается клапан 7. Кроме того, в корпусе 1 выполнен канал 14 для подачи водородно-кислородной смеси и углеродсодержащего газа, например пропан-бутана, а в ствольной насадке 15 выполнен канал 16 для подачи газопорошковой смеси, соединенный с каналом втулки 16а, и каналы 17 и 18 для подачи горючей смеси. Канал 14 соединен с инжектором 19 для подачи горючего газа, например водородно-кислородной смеси, и углеродсодержащего газа, например пропан-бутана. Для регулирования подачи подводимого к инжектору 19 углеродсодержащего газа, например пропан-бутана, служит регулятор сечения подачи газа (рис. 3), который выполнен в виде двух подпружиненных запорных клапанов: соответственно углеродсодержащего газа, например пропан-бутана - 20, и горючего газа, например водородно-кислородной смеси - 21. Клапан 21 установлен в глухом отверстии 22, а клапан 20 - в сквозном отверстии 23 корпуса 1 горелки и закреплены в них втулками 24 и 25. С другой стороны корпуса 1 горелки в сквозном отверстии 23 установлена игла 26 для регулирования подачи углеродсодержащего газа, например пропан-бутана, с регулирующим винтом 27.

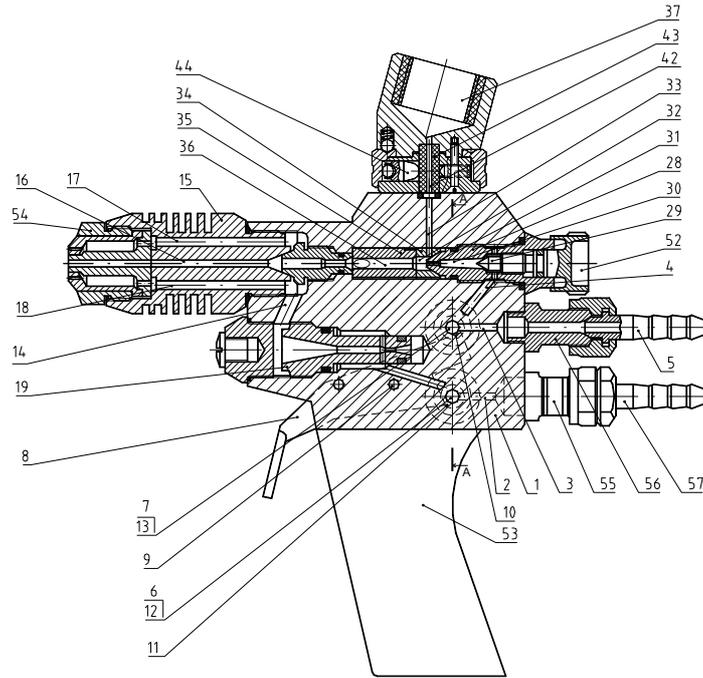


Рисунок 2 – Общий вид горелки (продольный разрез)

А-А

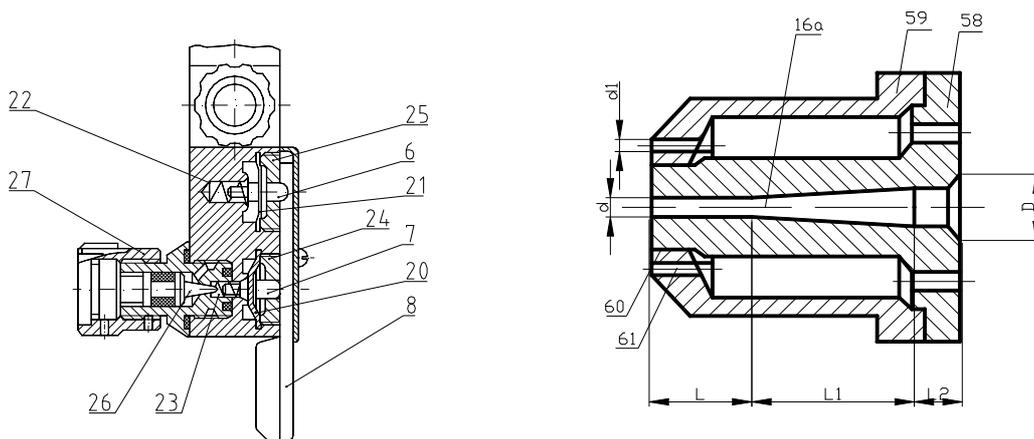


Рисунок 3 – Разрез А-А на рис. 2 (регулятор сечения газа)

Рисунок 4 – Сопловой наконечник горелки

Канал 4 для транспортирующего газа, в качестве которого используют водородно-кислородную смесь, соединен с отверстиями инжектора 28 для транспортирующего газа, выполненного в корпусе 1 горелки. Через корпус инжектора 28, кольцевую щель между иглой 29 игольчатого клапана подачи транспортирующего газа и каналом 30 транспортирующий газ проходит через калибровочное отверстие (инжекционное отверстие) 31 с высокой скоростью и пониженным давлением в смесительную порошковую камеру 32, создавая разрежение на выходе порошкового канала 33, что обеспечивает подсос порошка. В корпусе 1 горелки расположена распорная втулка 34 с отверстием для прохода порошка и втулка 35 с каналом 36 для газопорошковой смеси, соединенным с каналом 16 ствольной насадки 15.

Емкость для порошка 37 крепится двумя винтами 41 [4].

Канал 42 в упругой втулке 43 служит для подачи порошка из емкости для порошка 37. Регулирование подачи порошка производится путем изменения проходного сечения в упругой втулке 43 с помощью толкателя 44.

Регулирование подачи транспортирующего газа производится путем изменения проходного сечения кольцевой щели между иглой 29 и каналом 30 с помощью вентиля 52.

К корпусу 1 горелки жестко присоединена рукоятка 53. К ствольной насадке 15 крепится сопловой наконечник 54, а с противоположной стороны корпуса 1 установлены штуцеры 55 и 56, к которым с помощью накидных гаек крепятся ниппели 5 и 57. Ниппели 5 и 57 присоединены к гибким шлангам (не показаны).

Сопловой наконечник 54 состоит из втулки 58 (см. рис. 4) и мундштука 59, которые крепятся к ствольной насадке 15 накидной гайкой. Мундштук 59 выполнен с центральным соплом 60 и расположенными вокруг него по окружности двенадцатью выходными отверстиями 61 для горючего газа. Втулка 58 смонтирована в мундштуке 59 соосно с центральным соплом 60.

Канал 16а во втулке 58 соединен с каналом 16 и выполнен в виде цилиндрического отверстия с фаской, которое переходит в конусосужающуюся часть, продолжением которой является цилиндрический участок, при этом площадь выходного отверстия равна $0,5-1,3$ суммарной площади выходных отверстий мундштука, то есть $\pi(d)^2/4 = (0,5-1,3)n\pi(d_1)^2/4$, а длины частей порошкового канала имеет следующие размеры:

$$L = (4-6)d;$$

$$L_1 = (7-10)d;$$

$$L_2 = (0,5-0,6)D;$$

где d – диаметр выходного отверстия втулки порошкового канала;

D - диаметр входного отверстия втулки порошкового канала;

L – длина цилиндрического участка выходного отверстия втулки порошкового канала;

L_1 – длина конусосужающейся части отверстия втулки порошкового канала;

L_2 – длина цилиндрического отверстия с фаской входного отверстия втулки порошкового канала;

$\pi(d_{п.к.})^2/4$ – площадь выходного отверстия втулки порошкового канала;

$n\pi(d_{г.г.})^2/4$ - суммарная площадь выходных отверстий мундштука для горючего газа; где n – количество отверстий; d_1 - диаметр выходного отверстия мундштука.

Пример. Конкретные геометрические размеры соплового наконечника 54 горелки для газопламенного напыления порошковых покрытий с использованием водородно-кислородной смеси, вырабатываемой электролизом из воды, представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Геометрические размеры соплового наконечника горелки для газопламенного напыления порошковых покрытий с использованием водородно-кислородной смеси

d_1 , мм	D , мм	L , мм	L_1 , мм	L_2 , мм
0,6	1,5	6	19,2	1,8
0,6	1,9	9,8	15,4	1,8
0,6	2,3	13,6	11,6	1,8

Работа горелки осуществляется следующим образом.

Через ниппель 5 в горелку подается горючий газ, в качестве которого используют водородно-кислородную смесь, а через ниппель 57 - углеродсодержащий газ, например пропан-бутан. Поворотом рычага 8 открывают сначала запорный клапан 7, а затем клапан 6. Водородно-кислородная смесь поступает в инжектор 19 и засасывает углеродсодержащий газ, например пропан-бутан, смешиваясь с ним. Образовавшаяся горючая смесь поступает по каналу 14 через каналы 17 и 18 ствольной насадки 15 в сопловой наконечник 54 горелки. Регулировка характера углеродсодержащего пламени осуществляется регулировочным винтом 27 (рис. 3). Водородно-кислородная смесь поступает через канал 4 и кольцевую щель

между иглой 29 и каналом 30 в калибровочное отверстие 31 и, выходя из него, увлекает за собой порошкообразный материал, поступающий через канал подачи порошка 42 в упругую втулку 43, канал 33 и распорную втулку 34. Газопорошковая смесь по каналу 36 втулки 35 поступает в канал 16 ствольной насадки 15 и далее к сопловому наконечнику 54.

Толкатель 44 меняет проходное сечение в упругой втулке 43, что позволяет регулировать подачу порошка и устанавливать оптимальный режим напыления, или перекрывает канал совсем.

Предлагаемое соотношение размеров канала втулки и выходных отверстий мундштука соплового наконечника 54 предохраняет горелку от обратного удара по каналу 16.

ВЫВОДЫ

1. в результате такого способа газопламенного напыления порошковых покрытий продуктами сгорания горючей смеси является водяной пар, что позволяет избежать загрязнения окружающей среды от вредных выбросов;

2. использование в качестве транспортирующего газа вместо кислорода или воздуха водородно-кислородной смеси значительно повышает теплотемкость пламени горелки.

3. использование предлагаемого решения по сравнению с прототипом позволяет уменьшить загрязнения окружающей среды и вредных выбросов в атмосферу, получить в качестве продукта сгорания водяного пара за счет использования в качестве горючего и транспортирующего газов экологически чистой водородно-кислородной смеси, вырабатываемой электролизерами из воды, предотвратить образование обратных ударов в горелке по каналу втулки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хромов В. Н., Барабаш В. В., Верцов В. В., Корнев В. Н. Газотермическое напыление покрытий с использованием водородно-кислородной смеси. //Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 2-й Международной научно-технической конференции, 28-30 мая 2002г., г. Ялта. – Киев: АТМ Украины, 2002. – 260 с., с.217-220.

2. В. Н. Хромов, М. Г. Дегтярев, А. Л. Семешин, В. В. Барабаш, А. Ю. Родичев, В. Н. Корнев, С. А. Зайцев, Р. Ю. Блишников, С. М. Юрасов, В. В. Гончаренко. Упрочнение и восстановление деталей при производстве и ремонте машин. //Научные проблемы и перспективы развития ремонта, обслуживания машин и восстановления деталей: Материалы международной научно-технической конференции, М.: ГНУ ГОСНИТИ, 2003. – 156 с., с.107-115.

3. Пат. 2211096 Российская федерация, МПК⁷ B05B 7/20. Способ газопламенного напыления порошковых покрытий и горелка для его осуществления. Хромов В.Н., Плетнев Э.П., Абашев Н.Г., Верцов В.Г., Корovin А.Я., Верцов В.В., Барабаш В. В. - №2001125813/12; заявл. 20.09.2001; опубл. 27.08.2003. г. Бюл. №24. – 8 с.

4. Патент РФ 2188717. Горелка для газопламенного напыления порошковых покрытий. Опубл. Б.И. №25, 10.09.2002. Патентообладатель: ОрелГАУ. Плетнев Э. П., Хромов В. Н., Абашев Н. Г., Верцов В. Г., Корovin А. Я., Верцов В. В., Барабаш В. В.

Василий Николаевич Хромов

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Доктор технических наук, зав. кафедрой «Надежность и ремонт машин», профессор
Тел.: +7(4862)430741
E-mail: chrom@orel.ru

Владислав Николаевич Корнев

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин»
Тел.: +7(910)3047479
E-mail: kornev-vlad@list.ru

Виталий Витальевич Барабаш

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Мастер производственного обучения кафедры «Надежность и ремонт машин»
Тел.: +7(4862)723971
E-mail: vbarabash@list.ru

КОРОБКО В.И., БОЯРКИНА О.В.

СТАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЖЕСТКОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ШВА ДВУХСЛОЙНЫХ СОСТАВНЫХ БАЛОК

В статье разработаны теоретические основы статического метода контроля жёсткости горизонтального шва двухслойных составных балок.

The article describes theoretical basis of static method for control of rigidity horizontal of weld to-layer composite of beams.

Составные стержни и балки широко используются в строительстве и машиностроении. Теория расчета таких стержней разработана профессором А.Р. Ржаницыным [1]. При расчёте двухслойных составных балок на изгиб используется дифференциальное уравнение упругой оси балки

$$y^{IV} - \lambda^2 y'' = q / \sum_{i=1}^2 E_i I_i + \lambda^2 M_0 / (E_0 I_0), \quad (1)$$

в котором $\lambda = \sqrt{\xi \gamma}$; $\xi = T_c n / \Gamma$; $\gamma = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{E_i A_i} + \frac{c^2}{\sum_{i=1}^2 E_i I_i}$; $E_0 I_0 = \sum_{i=1}^2 E_i I_i + c^2 \frac{E_1 A_1 \cdot E_2 A_2}{\sum_{i=1}^2 E_i A_i}$; $M_0 = \int_0^x \int_0^x q dx^2$; ξ – коэффициент жесткости горизонтального шва; T_c – сдвигающее усилие, приходящееся на одну связь; n – число связей на единицу длины шва; Γ – деформация взаимного сдвига смежных волокон двух соседних слоёв, соединенных связями сдвига; q – интенсивность равномерно распределенной нагрузки; E – модуль упругости материала; A , I – соответственно площадь поперечного сечения и момент инерции каждого слоя балки, c – расстояние между центрами тяжести слоёв составной балки; M_0 – изгибающий момент в рассматриваемом сечении балки; индексы 1 и 2 относятся к физическим и геометрическим характеристикам первого и второго слоёв балки.

$$\gamma = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{E_i A_i} + \frac{c^2}{\sum_{i=1}^2 E_i I_i}; \quad (4) \quad E_0 I_0 = \sum_{i=1}^2 E_i I_i + c^2 \frac{E_1 A_1 \cdot E_2 A_2}{\sum_{i=1}^2 E_i A_i}; \quad (5)$$

$$M_0 = \int_0^x \int_0^x q dx^2;$$

Рассмотрим составную шарнирно опертую балку, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой q . Ввиду геометрической и физической симметрии заданной системы начало координат выберем в середине пролета (ℓ – половина пролета балки). В этом случае дифференциальное уравнение (1) примет следующий вид:

$$y^{IV} - \lambda^2 y'' = \frac{\lambda^2 q}{2} \cdot \frac{\ell^2 - x^2}{E_0 I_0} + \frac{q}{\sum_{i=1}^2 E_i I_i}. \quad (6)$$

Решением этого уравнения с учетом симметрии будет интеграл [1]

$$y = C_1 ch \lambda \ell + C_2 + \frac{q}{E_0 I_0} \left(\frac{x^4}{24} - \frac{\ell^2 x^2}{4} + \frac{x^2}{2\lambda^2} \right) - \frac{qx^2}{2\lambda^2 \sum_{i=1}^2 E_i I_i}, \quad (7)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, которые находят, используя граничные условия на конце балки $y(\ell) = 0$ и $y''(\ell) = 0$:

$$C_1 = \frac{q}{\lambda^4 D ch\lambda\ell}, \quad C_2 = -C_1 ch\lambda\ell + \frac{5}{24} \frac{q\ell^4}{E_0 I_0} + \frac{q\ell^2}{2\lambda^2 D} = \frac{5q\ell^4}{24E_0 I_0} + \frac{q}{D} \left(\frac{\ell^2}{2\lambda^2} - \frac{1}{\lambda^4} \right),$$

где

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} - \frac{1}{E_0 I_0}. \quad (8)$$

С учетом этих постоянных выражение (7) преобразуется к виду

$$y = \frac{q}{\lambda^4 D} \left[\frac{ch\lambda x}{ch\lambda\ell} + \frac{\lambda^2}{2} (\ell^2 - x^2) - 1 \right] + \frac{q}{24E_0 I_0} (5\ell^2 - x^2)(\ell^2 - x^2). \quad (9)$$

В середине пролета (при $x = 0$) будем иметь:

$$y_0 = y_{max} = \frac{q}{\lambda^4 D} \left[\frac{1}{ch\lambda\ell} + \frac{\lambda^2 \ell^2}{2} - 1 \right] + \frac{5q\ell^4}{24E_0 I_0}. \quad (10)$$

С помощью зависимости (9), используя математический аппарат сопротивления материалов, можно найти все необходимые характеристики напряженно-деформированного состояния составной балки в любом её сечении, если известно значение параметра ξ . К сожалению, в реальных составных конструкциях балочного типа значение этого параметра практически всегда неизвестно. Поэтому в теории сооружений важной является научная проблема экспериментального определения коэффициента жесткости горизонтального шва в составных балках.

В настоящее время эта проблема решается косвенно путем проведением статических испытаний составных балок или их фрагментов на сдвиг в продольном направлении с использованием зависимости (3). При проведении таких испытаний измеряют деформации взаимного сдвига смежных волокон соседних слоёв балки Γ . Этот способ весьма трудоёмок и не дает возможности определить коэффициент жесткости шва для составных балок, стоящих непосредственно в сооружении.

Решить эту задачу можно, используя зависимость (10). Для этого следует экспериментально найти прогиб балки от действия некоторой заданной равномерно распределенной нагрузки q , подсчитать значение приведённой изгибной жесткости $E_0 I_0$, аналитически по формуле (7) определить значение параметра λ и далее из выражения (2) найти коэффициент жёсткости шва ξ .

Сложность реализации этого способа заключается в том, что уравнение (10) является трансцендентным, и при его использовании необходимо преодолевать трудности вычислительного порядка. Однако при наличии персональных компьютеров эти трудности не существенны.

Тестирование предложенного способа можно провести на примере стальных ферм с параллельными поясами и регулярной решеткой, нагруженных равномерно распределённой нагрузкой по верхнему поясу. Такие фермы относятся к составным конструкциям балочного типа, в которых роль соединительного шва выполняет решётка ферм, и для них формула (10) будет справедлива.

Выбор металлических ферм для этих целей объясняется тем, что для некоторых типов решёток (рис. 1) в работе [1] получены точные аналитические зависимости для определения коэффициента жесткости решёток, а задача определения максимального прогиба ферм является элементарной задачей строительной механики.

Рассмотрим однопролётные шарнирно опертые по концам стальные фермы с параллельными поясами и регулярной решёткой (фиг. 2). Длина ферм $L = 2\ell = 12,0$ м, высота $c = 1,5$ м, длина панели B переменная от 0,5 до 3,0 м, элементы верхнего и нижнего поясов выполнены из стальных труб 180×6 мм ($E_1 = E_2 = 2 \times 10^5$ МПа, $A_1 = A_2 = 16,68$ см², $I_1 = I_2 = 653,47$ см⁴), а элементы решётки – из труб 140×6 мм ($A_p = A_c = 12,91$ см², где A_p и A_c – площади поперечных сечений элементов решетки и стоек соответственно). Фермы

нагружены по верхнему поясу равномерно распределенной нагрузкой $q = 3$ кН/м. Требуется определить коэффициент жёсткости решетки (коэффициент жесткости шва составной конструкции) с использованием предложенного способа.

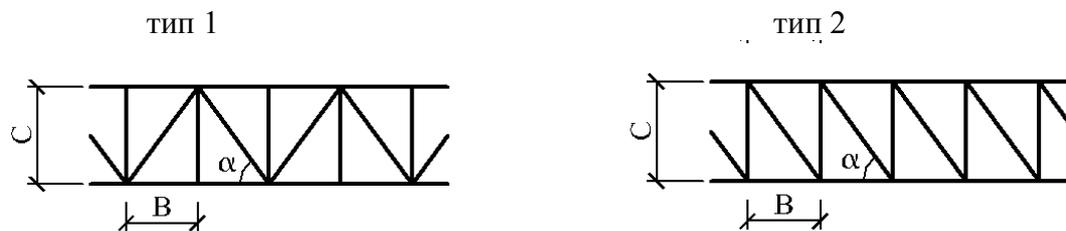


Рисунок 1 – Типы исследуемых решеток ферм

Расчёт фермы для определения максимального прогиба выполнялся на ЭВМ с использованием программного комплекса «SCAD». Значения коэффициентов жесткости шва ξ подсчитывались путем последовательных приближений из уравнения (10) и по точным формулам А.Р. Ржаницына [1]:

– для решетки первого типа
$$\xi = EA_p \cos^3 \alpha / B^2, \tag{11}$$

– для решетки второго типа
$$\xi = E / \left[B^2 \left(\frac{\cos^{-3} \alpha}{A_p} + \frac{\operatorname{tg}^3 \alpha}{A_c} \right) \right] \tag{12}$$

Результаты расчёта и сопоставления коэффициентов ξ сведены в таблицу.

Таблица – Определение коэффициента жесткости решётки стальных ферм с параллельными поясами

Тип решетки фермы	Длина панели В (м)	Прогиб y_0 , определенный с помощью «SCAD», м	Коэффициент ξ , подсчитанный по формуле (10)	Коэффициент ξ , подсчитанный по формулам (11) и (12)	Отклонение (%)
1	2	5	3	3	6
1	0,5	$1,106 \times 10^{-3}$	$8,421 \times 10^7$	$8,543 \times 10^7$	1,43
	1,0	$1,053 \times 10^{-3}$	$11,135 \times 10^7$	$11,530 \times 10^7$	3,43
	1,5	$1,042 \times 10^{-3}$	$10,540 \times 10^7$	$10,610 \times 10^7$	0,66
	2,0	$1,139 \times 10^{-3}$	$8,240 \times 10^7$	$8,645 \times 10^7$	4,68
	3,0	$1,329 \times 10^{-3}$	$5,136 \times 10^7$	$5,369 \times 10^7$	4,34
2	0,5	$1,342 \times 10^{-3}$	$4,550 \times 10^7$	$4,608 \times 10^7$	1,25
	1,0	$1,174 \times 10^{-3}$	$7,069 \times 10^7$	$7,314 \times 10^7$	3,35
	1,5	$1,106 \times 10^{-3}$	$7,789 \times 10^7$	$7,840 \times 10^7$	-0,65
	2,0	$1,203 \times 10^{-3}$	$6,751 \times 10^7$	$7,109 \times 10^7$	3,91
	3,0	$1,350 \times 10^{-3}$	$4,703 \times 10^7$	$4,929 \times 10^7$	4,59

Из этой таблицы видно, что с помощью предложенного способа можно с удовлетворительной точностью определять значение коэффициента жесткости горизонтального шва составных балок. Этот способ проще в реализации и менее трудоёмок, чем способ при испытании конструкций на сдвиг, и его можно рекомендовать для широкого применения в расчетной практике и экспериментальной технике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки. – М.: Стройиздат, 1986. – 316 с.

Виктор Иванович Коробко

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Профессор кафедры «Строительные конструкции и материалы»
Тел. (4862)734395, E-mail. center_epb@ostu.ru

Ольга Владимировна Бояркина

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Студентка группы ПБ-41
Тел. (4862)471066

УДК 621.075.32

М.А. УВАРОВ, В.П. СМОЛЕНЦЕВ, Б.И. ОМИГОВ

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Рассмотрено технико-экономическое обоснование и система управления при ремонте различных видов наземной и воздушной транспортной техники гражданского и военного назначения с учетом её эксплуатации в воинских частях. Разработаны требования к технологическому оснащению ремонтных служб.

Technical and economic explanation and the system of control by repairing different kinds of surface and air transport equipment for civil and military purposes with regard for its exploitation in military units are examined. Demands for technological equipment of the repair services are worked out.

Транспортные машины составляют значительную часть материального обеспечения людей. Они включают (рисунок 1) наземные, воздушные и космические средства.

Восстановление качества этой техники предполагает возможность плановой или аварийной замены отдельных узлов и деталей, ремонт объектов машины без ее разборки или с частичной разборкой, модернизацию техники с целью повышения ее эксплуатационных качеств. Такие работы выполняются для стационарных установок, где на неподвижном объекте перемещаются какие-то грузы. Здесь при ремонте на месте эксплуатации может быть заменена основная часть узлов. Подобная система ремонта и восстановления изделий достаточно хорошо исследована, установлены нормативные сроки материального и физического износа, после чего требуется замена машин (как правило на новые более современные).

Однако для обслуживаемой техники военного назначения имеются свои требования к наземным транспортным машинам. Они связаны с техническим уровнем, например авиационных изделий. В частности это относится к виду самолетов и вертолетов: для легких машин используют аэродромные автомобили, тягачи невысокой грузоподъемности, для тяжелых аппаратов требуются мощные транспортные средства. Это вызывает необходимость в разработке системы эксплуатации и ремонта техники, обслуживаемой воздушные машины, которые могут базироваться в труднодоступных местах с ограниченными возможностями для доставки запасных частей. Поэтому необходима научно обоснованная система управления запасами деталей и узлов с минимизацией их объемов, что позволяет использовать часть высвобождающихся средств на социальные нужды.

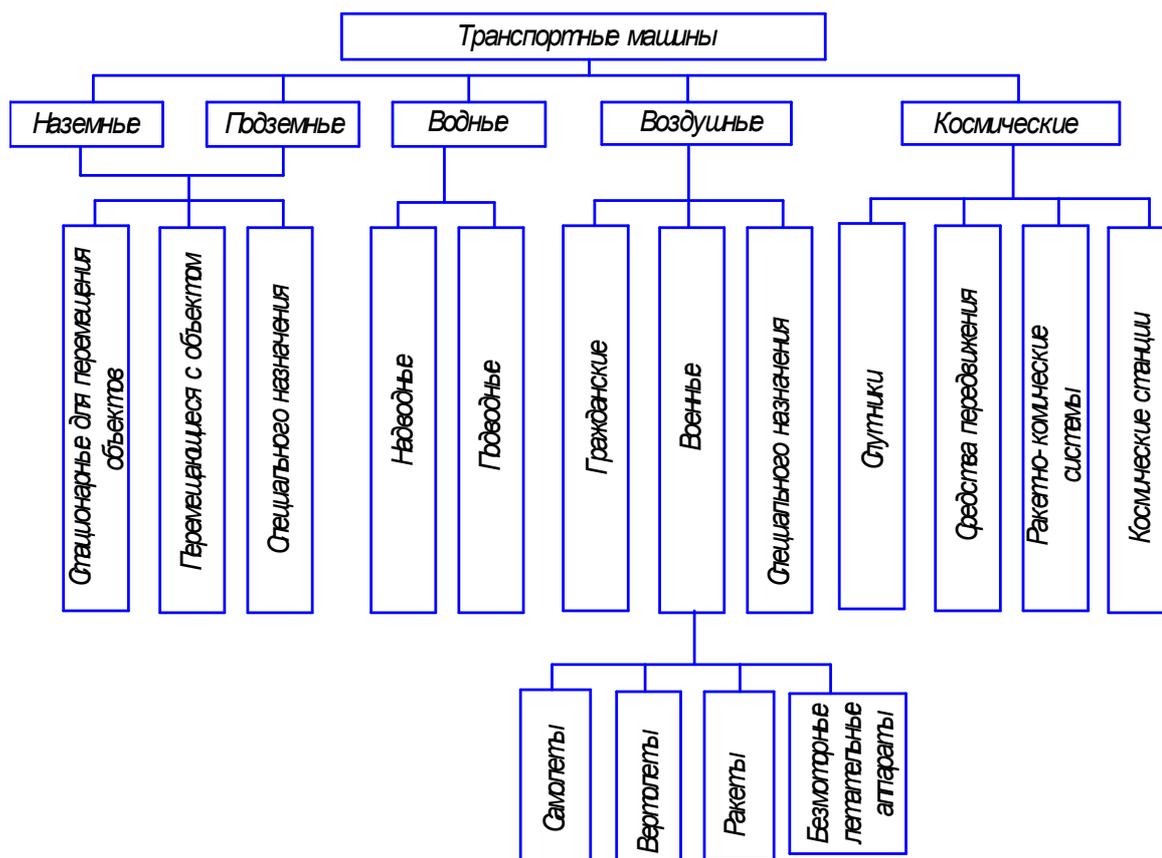


Рисунок 1 - Основные виды транспортных машин

Особый класс машин составляют водные (речные, озерные, морские) средства с механическим приводом или без него; автономные и связанные с судами сопровождения; гражданского или военного назначения; надводные или подводные. Здесь сложилась система ремонта и восстановления качества с использованием в основном базы изготовителей.

Для воздушных транспортных систем заложены особые требования. Здесь в документации законодательно заложены предполетные и периодические регламентные работы и испытания. Для таких объектов восстановление качества во время полета, как правило, затруднительно или невозможно.

В связи с перевооружением отечественной армии постоянно появляются новые воздушные машины военного назначения, где используются оригинальные узлы и детали, не подлежащие восстановлению в полевых условиях. Требуются запасные части, хранение, поддержание годности которых, требует значительных средств. Если планировать запасы таких изделий на местах ниже уровня потребности, то снизится боеготовность военной техники, при излишних запасах – возрастают материальные затраты. Кроме того, ограниченный ресурс хранения запасных изделий приводит к потере средств из-за списания по срокам хранения технически пригодных узлов и деталей воздушных машин. Поэтому система поддержания боеготовности военной воздушной техники должна включать элементы материального обеспечения, проведения дефектации, переборки, испытания работоспособности и технических показателей восстановленных узлов, поддержание условий эксплуатации изделий.

Космические аппараты (рисунок 1) в процессе эксплуатации не подлежат восстановлению и при обнаружении серьезных сбоев в работе подлежат уничтожению, хотя в них часть отказов может компенсироваться дублирующими системами.

Таким образом из видов транспортной техники, где возможно восстановление качества изделий, наиболее сложной представляется система для летательных аппаратов

военного назначения, работающих в условиях высоких перегрузок, в режиме постоянной готовности к применению, как правило, расположенных вдали от крупных ремонтных баз.

Проведен анализ временных и финансовых затрат на ремонт типовых изделий воздушного назначения (вертолеты) и наземных транспортных средств для обслуживания летательных аппаратов (рисунки 2,3).

На рисунке 2 показана доля затрат времени на поиск, устранение сбоев в работе для типовых случаев нарушения работоспособности изделий. Данные на рисунках 2,3 охватывают длительный период эксплуатации воздушной и наземной техники. Как видно на рисунке 2 (позиции 1-5) диагностика занимает основную часть трудоемкости восстановления изделий (до 70-75% от общей величины трудозатрат).

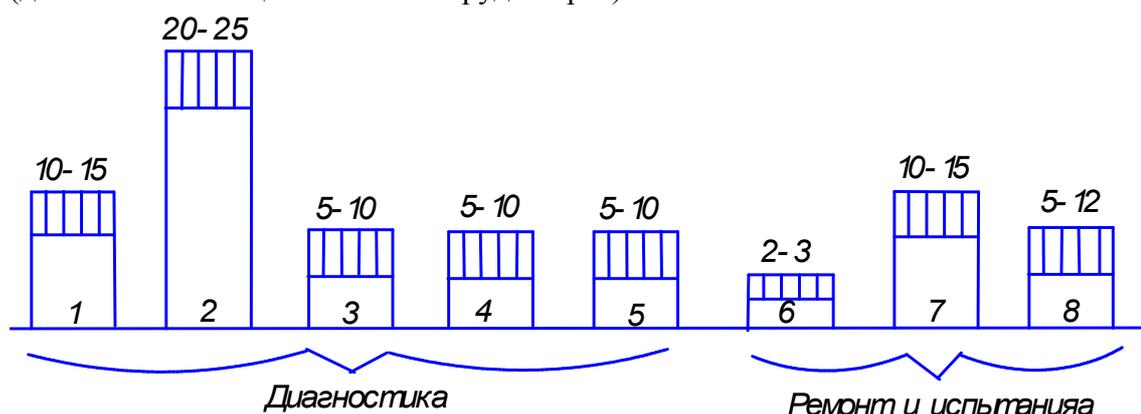


Рисунок 2 - Структура трудоемкости восстановления изделий (в % от общей)

1 – логический анализ причин и места появления нештатной ситуации или поломки; 2 – инструментальный анализ и выявление причин появления дефекта; 3 – разборка объекта и анализ дефекта; 4 – обоснование метода восстановления дефекта; 5 – формирование технологии ремонта и технологической документации; 6 – комплектация и расконсервация запасных частей; 7 – ремонт; 8 – контроль качества и испытание объекта после ремонта.

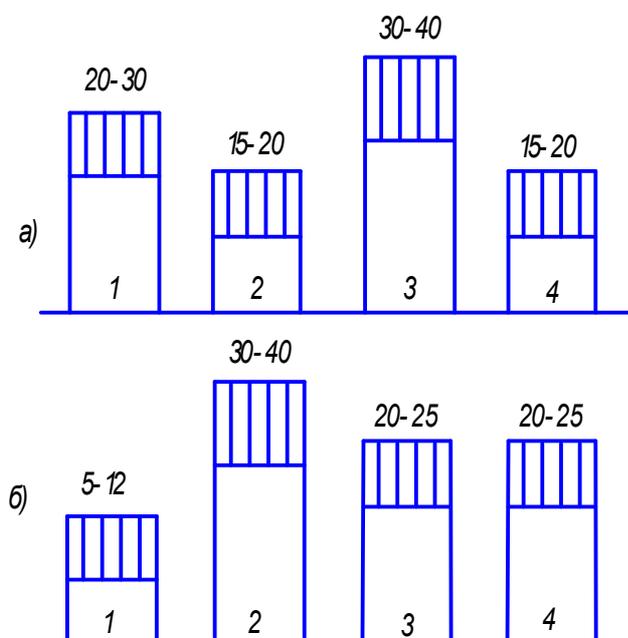


Рисунок 3 - Структура материальных затрат и потерь на восстановление техники (в процентах от общих затрат)

а) вертолетов; б) наземных транспортных средств.

При этом первичный анализ (позиция 1) причин и места нахождения дефекта влияет на эффективность работ по разборке и исследованиям дефектных объектов на стендах, приборах, устройствах (позиции 2,3), то есть фактически зависит от правильности первичного анализа. Аналогичное влияние первичный анализ оказывает на трудоемкость технологической подготовки процесса ремонта и восстановления работоспособности изделий (позиции 4,5 на рисунке 2).

Затраты времени на ремонт объекта, его настройку, испытания и контроль качества (позиции 6,7,8) составляют 25-30% от общей трудоемкости, что соответствует данным, приведенным в [1], [2] для заключительных этапов жизненного цикла изделий.

Материальные затраты на ремонт и восстановление работоспособности техники в воинских частях приведены на рисунке 3.

Как известно, современная авиационная техника (в рассматриваемом случае - вертолеты) работает при высоких нагрузках, требует повышенной надежности. Работоспособность обеспечивается качеством изготовления, текущего контроля состояния, мероприятиями по восстановлению работоспособности и качества изделий.

Для управления экономической политикой при восстановлении изделий необходима адаптивная система распределения финансовых потоков, обеспечивающих минимальные простои военной техники (воздушной – рисунок 3,а; наземной – рисунок 3,б). Временное выведение из эксплуатации вертолетов (рисунок 3,а; позиция 1) приводит к потерям до 30% от общих затрат на ремонт и восстановление изделий. На этот показатель непосредственное влияние оказывает (позиция 2 на рисунке 3,а) трудоемкость диагностики (рисунок 2). Затраты на запасные части и ремонт (позиции 3,4 на рисунке 3,а) составляют около 50 % от общей стоимости восстановления, из которой основную долю занимают средства на приобретение деталей и узлов, что в условиях воинских частей не зависит от ремонтных служб на местах. Следовательно, повышение эффективности экономического управления при восстановлении воздушной техники во многом зависит от механизма ускоренного принятия обоснованных управленческих решений о характере, месте появления дефекта и путях его устранения при минимальных потерях из-за простоя техники. Это позволяет перераспределить средства в сторону расширения затрат на социальные нужды служащих.

Наземная обслуживающая транспортная техника (рисунок 3,б), как правило, многократно дублируется, поэтому её простои на плановый и аварийный ремонт в меньшей степени сказываются на общих материальных потерях и затратах на устранение дефектов (рисунок 3,б). Однако если исключить из рассмотрения затраты (позиция 3) на запчасти, то доля потерь из-за простоев увеличится до двух раз и может заметно изменить результаты экономической и социальной работы (и не всегда в лучшую сторону) технических служб.

Приведенные на рисунках 2;3 сведения однозначно показывают, что для эффективного управления экономической и социальной политикой необходима система ускоренного анализа и поиска путей восстановления изделий, включающая как типовые методы, так и создание новых способов, применимых в условиях их использования в воинских частях.

Учитывая расположение мест эксплуатации (как правило удаленных от транспортных магистралей и изготовителей изделий) техники (особенно воздушной), целесообразно текущий ремонт в частях выполнять путем замены вышедших из строя объектов на новые, аттестованные изготовителем. Для этого собственное технологическое оснащение должно обеспечивать:

- поддержание требуемого уровня квалификации исполнителей, в том числе ремонтных служб;
- изготовление и комплектацию технологической оснастки для ремонта и восстановления изделий;
- изготовление на своей базе части деталей, в основном, для наземной транспортной техники;

- ремонт и восстановление техники для диагностики и испытаний изделий в процессе эксплуатации;
- выполнение заказов со стороны руководства части для нормального функционирования социальных объектов;
- наличие гарантированных запасов ремонтных комплектов с учетом результатов статистических исследований по вероятности выхода из строя аналогичных изделий и нормативных ограничений времени хранения;
- ручные и переносные средства обработки для восстановления крупногабаритных элементов изделий или объекта в целом.

Для выполнения работ по восстановлению техники службы подготовки и контроля изделий оснащаются универсальным обрабатывающим оборудованием и специальными установками (испытательные стенды, контрольные, диагностические станции, системы).

С целью эффективного управления [3] восстановлением изделий необходима периодическая переподготовка специалистов для освоения новых технологий изготовления, диагностики, восстановления наземной и воздушной техники.

Капитальный ремонт изделий (в том числе восстановление аварийных средств) выполняют аттестованные для этих целей отраслевые предприятия. Функции подразделений воинских частей в этом случае сводятся к подготовке изделий (частичной разборке, консервации, упаковке) и транспортировке к исполнителю (с сопроводительной документацией). После восстановления техники ее возвращают и испытывают в условиях эксплуатации. Материалы таких испытаний могут оказаться полезными при последующих операциях диагностики и восстановления техники, при создании информационной системы в масштабе воинской части или отрасли.

При разработке технологии ремонта техники необходимо обосновать выбор способов восстановления изделий на месте эксплуатации или на ремонтных предприятиях (в том числе на заводах – изготовителях). Основные методы восстановления техники приведены в [4]. Ремонт крупных деталей воздушной и наземной техники (панели, крышки, люки и др.) обычно выполняют на месте эксплуатации.

Последовательность восстановления изделий различного назначения приведена в форме алгоритма на рисунке 4.

Здесь все этапы восстановления можно разделить на структурные элементы, приведенные на рисунке 2.

Использование алгоритмов позволяет создать непосредственно на месте эксплуатации техники банк данных с поисковой системой определения причин появления нештатной ситуации, что многократно ускоряет определение причин, места нахождения неисправности. Такая система автоматической дефектации существует в опытных конструкторских бюро авиационной техники. Хорошие результаты получены при использовании в качестве поисковой системы теории делового конфликта [5], позволяющей через ядро конфликта ускоренно войти в область конкретных возможных дефектов при любом объеме известной информации о нештатной ситуации у воздушной и наземной техники. Применение поисковой системы предполагает наличие квалифицированных специалистов-экспертов и главного эксперта (как правило, командира воинской части), который обладает правом принять окончательное решение в случаях разногласия экспертов или при несогласии с результатами автоматизированного анализа на ЭВМ, выполненного с использованием математического обеспечения на базе делового конфликта.

По мере совершенствования системы экономического управления восстановлением техники с учетом специфики воинских частей уточняются нормативы выполнения работ, номенклатура и объемы хранения на складах запасных частей, оптимизируется структура связей между руководством и исполнителями, что дает возможность снизить затраты на восстановление, сократить сроки нахождения техники в нерабочем состоянии (во всяком случае уложиться в установленные регламенты), создать экономическую систему стимулирования исполнителей.

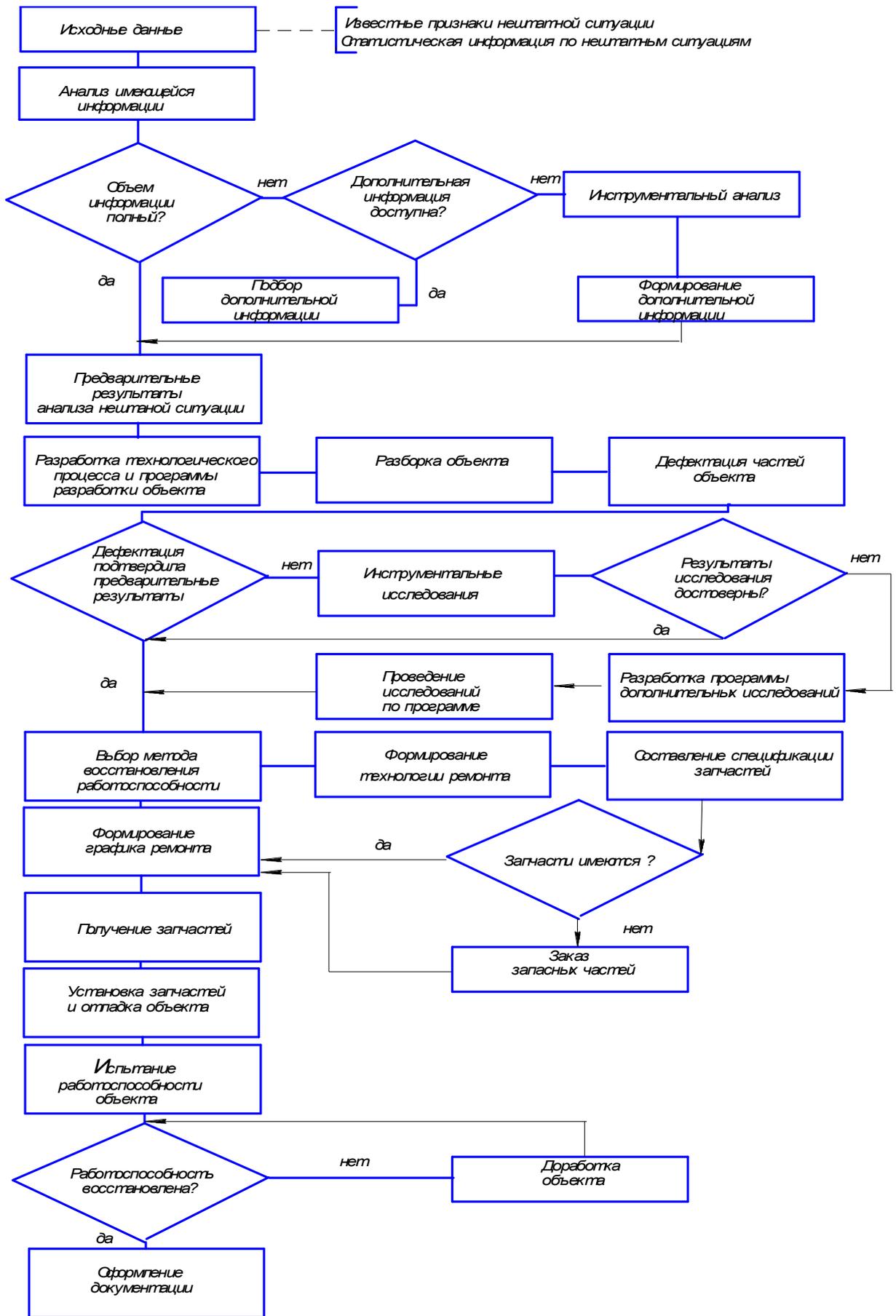


Рисунок 4 - Алгоритм выполнения работ по восстановлению качества транспортных машин

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарь А.В. Качество и надежность М.: Машиностроение, 2007. – 308 с.
2. Смоленцев В.П. Отработка конструкций электрохимического оборудования на технологичность / В.П. Смоленцев, А.И. Часовских // Сб. научн. тр., М.: Станкин, 1977, Вып. 3. – С. 77-82
3. Уваров М.А. Система управления организацией ремонта транспортной техники / М.А. Уваров, В.П. Смоленцев // Совершенствование производства поршневых двигателей для малой авиации, Тр. отрасл. науч.-техн. конф., М.: Машиностроение, 2008. – С. 26-34
4. Смоленцев В.П. Технология машиностроения. Восстановление качества и сборка деталей машин / В.П. Смоленцев, Г.А. Сухочев, А.И. Болдырев, Е. В. Смоленцев, А.В. Бондарь, В.Ю. Склокин // Воронеж, Воронежский государственный технический университет, 2008. – 303 с.
5. Зуйков К.Г. Принятие квалифицированных решений в процессе создания качественных изделий / К.Г. Зуйков, А.В. Гребенщиков // Справочник. Инженерный журнал, 2008, № 2. – С. 39-44.

М.А. Уваров

Инженер Воронежского механического завода

В.П. Смоленцев

Научный руководитель Воронежского механического завода

Доктор технических наук, профессор

Б.И. Омигов

Заместитель генерального директора Воронежского механического завода

УДК 621.785

В. Н. ХРОМОВ, В. Н. КОРЕНЕВ, В. В. БАРАБАШ.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОГО ПЛАМЕНИ С МАТЕРИАЛОМ ОСНОВЫ И ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ГАЗОПЛАМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ

Теоретически проанализировано, что при протекании процесса напыления водородно-кислородным пламенем с органической добавкой пропан-бутана образуются оксиды кремния, хрома, бора, карбиды кремния и бора, что увеличивает микротвердость напыленных покрытий. Экспериментально подтверждено, что применение добавки пропан-бутана к водородно-кислородной смеси для газопламенного напыления позволяет повысить микротвердость получаемых покрытий.

It is theoretically analysed, that at course of process spraying by a hydrogen-oxygen flame with the organic additive of propane-butane are formed oxids of silicon, chrom, and bor, carbids of silicon, chrom, and bor that increases microhardness sprayied coatings. It is experimentally confirmed, that application of the additive of propane-butane to a hydrogen-oxygen mix for flame spraying allows to raise microhardness of received coverings.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для упрочнения и восстановления деталей машин широкое применение находит метод газопламенного напыления порошковых материалов. Благодаря своей технологической простоте и доступности, при высоких показателях качества восстановленной поверхности метод газопламенного напыления используется для упрочнения и восстановления различных участков изношенной детали. Существенным недостатком газопламенного напыления является выделение при напылении продуктов сгорания органического топлива [1].

Использование водородно-кислородной смеси для газопламенного напыления дает возможность избавиться от существенного недостатка при напылении, выделении продуктов сгорания органического топлива [2].

Поэтому разработка и внедрение технологии газопламенного напыления с использованием водородно-кислородного пламени является актуальной задачей требующей своего решения [3, 4].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Науку о взаимных превращениях различных видов энергии называют термодинамикой. Термодинамика устанавливает законы превращений, направление самопроизвольного течения различных процессов в данных условиях.

При химических реакциях происходят глубокие качественные превращения в системе, сопровождающиеся поглощением и выделением энергии.

Раздел термодинамики, изучающий тепловые эффекты химических реакций, называют термохимией. Реакции, сопровождающиеся выделением теплоты, называют экзотермическими ($\Delta H < 0$), реакции сопровождающиеся поглощением теплоты – эндотермическими ($\Delta H > 0$). В термохимических реакциях указывают количество выделенной и поглощенной теплоты. Значение ΔH приводят справа от уравнения, отделяя его запятой.

При любом процессе соблюдается закон сохранения энергии. Теплота Q , поглощенная системой, идет на изменение внутренней энергии ΔU и на совершение работы A .

$$Q = \Delta U + A \text{ - первый закон термодинамики.} \quad (1)$$

Внутренняя энергия системы – это общий ее запас, включающий энергию различных видов (поступательную и вращательную энергию молекул, энергию движения электронов, внутриядерную энергию и т. д.)

Внутренняя энергия является функцией состояния, т. е. ее изменение определяется начальным и конечным состоянием системы и не зависит от пути перехода, по которому протекает процесс $\Delta U = U_2 - U_1$, где ΔU – изменение внутренней энергии системы при переходе от начального и конечного состояния U_1 в конечное U_2 .

Теплота и работа являются функциями состояния, так как связаны с процессом и зависят от массы тела. В химических реакциях A – работа против внешнего давления ($A = P \Delta V$).

Большинство химических реакций проходит при постоянном давлении. Для изобарно-изотермических процессов ($P = \text{const}$, $T = \text{const}$) теплота:

$$Q_p = \Delta U + P \cdot \Delta V. \quad (2)$$

Если сумму $\Delta U + P \cdot \Delta V$ обозначить через H , тогда

$$Q_p = \Delta H. \quad (3)$$

Величина H – энтальпия. Энтальпия является функцией состояния. Ее изменение (ΔH) определяется только начальным и конечным состоянием системы и не зависит от пути перехода.

Теплота реакции в изохорно-изотермическом процессе ($V = \text{const}$, $T = \text{const}$), при котором $\Delta V = 0$, равна изменению внутренней энергии системы:

$$Q_v = \Delta U. \quad (4)$$

Теплоты химических процессов, протекающих при $P, T = \text{const}$, $T, V = \text{const}$, называют тепловыми эффектами.

При экзотермических реакциях энтальпия системы уменьшается и $\Delta H=0$, при эндотермических – энтальпия увеличивается и $\Delta H>0$.

Термохимические расчеты основаны на законе Гесса:

тепловой эффект химической реакции зависит только от природы и физического состояния исходных и конечных продуктов, но не зависит от пути перехода.

Следствие из закона Гесса:

Тепловой эффект реакции ($\Delta H_{x.p.}$) равен сумме теплот образования ($\Delta H_{обр.}$) продуктов реакции за вычетом суммы теплот образования исходных веществ с учетом коэффициентов перед формулами веществ.

$$\Delta H_{x.p.} = \sum \Delta H_{обр}^{prod.} - \sum \Delta H_{обр}^{исх.} \quad (5)$$

Если рассматриваемый процесс – горение, то

$$\Delta H_{x.p.} = \sum \Delta H_{гор}^{исх.} - \sum \Delta H_{гор}^{prod.} \quad (6)$$

Энтропия (S) также как внутренняя энергия, тепловой эффект химической реакции, объем, является свойством вещества и функцией состояния. Она отражает движение частиц вещества и является мерой неупорядоченности системы. Энтропия увеличивается с увеличением движения частиц – нагревании, испарении, плавлении.

Движущая сила процесса складывается из двух сил: стремления к упорядочению (H) и стремления к беспорядку (TS), так как энтропия растет с повышением температуры и можно считать, что мера беспорядка $\approx T\Delta S$.

При постоянном давлении и температуре общую движущую силу процесса, которую обозначают ΔG , можно найти из соотношения:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S. \quad (7)$$

Например, при протекании процесса напыления на изделие из материала Сталь 15ХГН2ТА (хромо-марганцово-никелевая с титаном и бором), порошковым материалом ПР-НХ17С4Р4 содержащего никель (температура плавления 1455°C), бор (температура плавления 2075°C), кремний (температура плавления 1415°C), хром (температура плавления 1903°C) в температуре пламени $2700-3000^{\circ}\text{C}$ возможны несколько химических процессов, в ходе которых могут образоваться продукты, снижающие качество полученных покрытий.

Основная задача – определить возможность протекания химических реакций образования соответствующих оксидов и карбидов металлов и неметаллов при данной температуре и прогнозировать возможность изменения свойств материала.

Так, процесс горения протекает в две стадии:

1. этап горения.



Водород может быть восстановителем, однако, с металлами, обладающими такими же свойствами, реагировать не будет.

Водород может взаимодействовать с кремнием



В ходе химической реакции возможно образование оксида кремния, который ухудшает качество напыления и прочность поверхности.

Определим возможность протекания реакции при температуре 2700°C (2923 K) по формуле

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S. \quad (11)$$

$$\Delta S_{\text{Si}} = 18,83 \text{ Дж/моль}\cdot\text{K}$$

$$\Delta S_{\text{H}_2 (г)} = 130,52 \text{ Дж/моль}\cdot\text{K}$$

$$\Delta S_{\text{SiH}_4} = 204,56 \text{ Дж/моль}\cdot\text{K}$$

$$\Delta S_{x.p.} = \sum \Delta S^{prod.} - \sum \Delta S^{исх.}$$

$$\Delta S_{x.p.} = \Delta S_{\text{SiH}_4} - (\Delta S_{\text{Si}} + 2 \Delta S_{\text{H}_2 (г)})$$

$$\Delta S_{x.p.} = 204,56 - 130,52 \cdot 2 - 18 = -75,31 \text{ Дж/моль}\cdot\text{K}$$

Тепловой эффект химической реакции равен 34 кДж .

$$\Delta G_1 = 34,73 - 2923 \cdot (-0,07531) = 254,9 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_2 = 34,73 - 3273 \cdot (-0,07531) = 281,2 \text{ кДж.}$$

Так как ΔG – изобарно-изотермический потенциал (энергия Гиббса) и $\Delta G < 0$, то процесс принципиально осуществим, если $\Delta G > 0$, то процесс самопроизвольно протекать не может, если $\Delta G = 0$, то система находится в состоянии равновесия.

В данном случае $\Delta G > 0$, следовательно, при этих температурах реакция протекать не может.

2. этап горения.



В ходе реакции используется кислород воздуха, который является окислителем металлов и неметаллов.

Определим роль кислорода и возможность протекания следующих процессов:

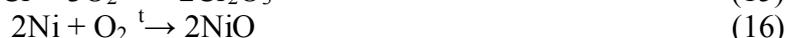
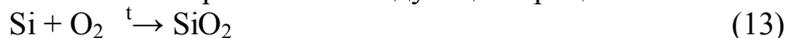


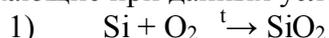
Таблица 1- Значения ΔH и ΔS для различных химических соединений.

соединение	ΔH , кДж/моль	ΔS , Дж/моль·К
SiO ₂	- 910,94	41,84
B ₂ O ₃	- 1270,43	53,84
Cr ₂ O ₃	- 1140,56	81,17
NiO	- 239,74	37,99

Таблица 2 - Значения ΔS для различных веществ

соединение	ΔS , Дж/моль·К
O ₂	205,04
B	5,86
Ni	29,87
Si	18,83

Учитывая уравнение $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, можно определить самопроизвольно протекающие при данных условиях процессы.

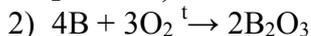


$\Delta H_{\text{x.p.}} = (\Delta H_{\text{SiO}_2}) - (\Delta H_{\text{Si}} + \Delta H_{\text{O}_2}) = \Delta H_{\text{SiO}_2} = - 910,94 \text{ кДж/моль}$, так как теплота образования простых веществ равна нулю.

$$\Delta S_{\text{x.p.}} = (\Delta S_{\text{SiO}_2}) - (\Delta S_{\text{Si}} + \Delta S_{\text{O}_2}) = 41,81 - 18,83 - 205,04 = -182,06 = - 0,18206 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_1 = - 910,94 - 2923 \cdot (- 0,18206) = -378,78 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_2 = - 910,94 - 3273 \cdot (- 0,18206) = -315,03 \text{ кДж}$$

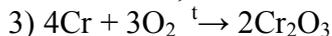


$$\Delta H_{\text{x.p.}} = (2\Delta H_{\text{B}_2\text{O}_3}) - (4\Delta H_{\text{B}} + 3\Delta H_{\text{O}_2}) = 2 \cdot (-1270,43) = - 2540,86 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta S_{\text{x.p.}} = 2(\Delta S_{\text{B}_2\text{O}_3}) - (4\Delta S_{\text{B}} + 3\Delta S_{\text{O}_2}) = 2 \cdot 53,84 - 4 \cdot 5,86 - 3 \cdot 205,04 = - 530,58 = - 0,53 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_1 = - 2540,86 - 2923 \cdot (- 0,53) = -991,67 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_2 = - 2540,86 - 3273 \cdot (- 0,53) = -806,15 \text{ кДж}$$

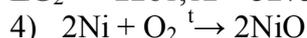


$$\Delta H_{\text{x.p.}} = (2\Delta H_{\text{Cr}_2\text{O}_3}) - (4\Delta H_{\text{Cr}} + 3\Delta H_{\text{O}_2}) = 2 \cdot (-1140,56) = - 2281,12 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta S_{\text{x.p.}} = 2(\Delta S_{\text{Cr}_2\text{O}_3}) - (4\Delta S_{\text{Cr}} + 3\Delta S_{\text{O}_2}) = 2 \cdot 81,17 - 4 \cdot 23,64 - 3 \cdot 205,04 = - 547,34 = - 0,547 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_1 = -2281,12 - 2923 \cdot (-0,547) = -677,32 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_2 = -2281,12 - 3273 \cdot (-0,547) = -490,79 \text{ кДж}$$



$$\Delta H_{\text{x.p.}} = (2\Delta H_{\text{NiO}}) - (2\Delta H_{\text{Ni}} + \Delta H_{\text{O}_2}) = 2 \cdot (-239,74) = -479,5 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta S_{\text{x.p.}} = 2(\Delta S_{\text{NiO}}) - (2\Delta S_{\text{Ni}} + \Delta S_{\text{O}_2}) = 2 \cdot 37,99 - 2 \cdot 29,87 - 205,04 = -188,8 = -0,189 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_1 = -479,5 - 2923 \cdot (-0,189) = 74,65 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_2 = -479,5 - 3273 \cdot (-0,189) = 139,01 \text{ кДж}$$

В данном случае $\Delta G > 0$, следовательно, при этих температурах реакция протекать не может.

При горении кислородно-водородной смеси активно протекают процессы окисления металлов, приводящие к образованию оксидов соответствующих металлов и неметаллов (ΔG имеет значение от -500 кДж до -300 кДж).

Учитывая примеси пропана и бутана, необходимо выяснить роль углерода в окислительно-восстановительных процессах, протекающих при данных температурах. При горении смеси углеводородов образуется углекислый газ, который может быть восстановлен водородом до свободного углерода. Углерод в свою очередь может образовывать карбиды металлов, улучшающие свойства сплавов.

Для реакций



рассчитаем изобарно-изотермический потенциал.

Таблица 3- Значения ΔH и ΔS для различных химических соединений.

Соединение	ΔH , кДж/моль	ΔS , Дж/моль·К
CB_4	79,5	230,12
SiC	-66,8	16,62
CrC_4	-41,0	5,6

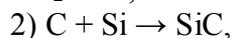


$$\Delta H_{\text{x.p.}} = \Delta H_{\text{CB}_4} - \Delta H_{\text{C}} - 4\Delta H_{\text{B}} = 79,5 \text{ кДж/моль.}$$

$$\Delta S_{\text{x.p.}} = \Delta S_{\text{CB}_4} - \Delta S_{\text{C}} - 4\Delta S_{\text{B}} = 230,12 - 5,7 - 4 \cdot 5,8 = 201,22 = 0,201 \text{ кДж.}$$

$$\Delta G_1 = 79,5 - 2923 \cdot (0,201) = -508,02 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_2 = 79,5 - 3273 \cdot (0,201) = -578,8 \text{ кДж}$$



$$\Delta H_{\text{x.p.}} = \Delta H_{\text{SiC}} - \Delta H_{\text{C}} - \Delta H_{\text{Si}} = -66,8 \text{ кДж/моль.}$$

$$\Delta S_{\text{x.p.}} = \Delta S_{\text{SiC}} - \Delta S_{\text{C}} - \Delta S_{\text{Si}} = 16,62 - 18,8 - 5,74 = -7,92 = -0,008 \text{ кДж.}$$

$$\Delta G_1 = -66,8 - 2923 \cdot (-0,008) = -43,416 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_2 = -66,8 - 3273 \cdot (-0,008) = -40,62 \text{ кДж}$$



$$\Delta H_{\text{x.p.}} = \Delta H_{\text{Cr}_4\text{C}} - \Delta H_{\text{C}} - \Delta H_{\text{Cr}} = -41,0 \text{ кДж/моль.}$$

$$\Delta S_{\text{x.p.}} = \Delta S_{\text{Cr}_4\text{C}} - \Delta S_{\text{C}} - \Delta S_{\text{Cr}} = 5,6 - 18,8 - 23,6 = -36,8 = -0,0368 \text{ кДж.}$$

$$\Delta G_1 = -41,0 - 2923 \cdot (-0,0368) = 66,6 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_2 = -41,0 - 3273 \cdot (-0,0368) = 79,45 \text{ кДж.}$$

Поскольку изобарно-изотермический потенциал больше нуля эта реакция не осуществима.

Анализируя изменение изобарно-изотермического потенциала в зависимости от температуры, необходимо отметить, что в данном температурном интервале образуются

оксиды кремния, хрома, бора, карбиды кремния и бора, что увеличивает микротвердость напыленных покрытий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выявления особенностей соединения напыленного металла и основного металла детали, а также для анализа структурных изменений и распределения температур в поверхностном слое детали были проведены металлографические исследования и измерение микротвердости поверхностного слоя. Металлографическому анализу подвергались обработанные газопламенным напылением порошковых материалов участки.

Для исследования покрытия с неоднородной по сечению структурой используют поперечный шлиф, его плоскость перпендикулярна продольной оси. Для изготовления шлифов использовались образцы с нанесенными покрытиями газопламенным напылением с последующим оплавлением с использованием различных горючих газов (по составу). Микрошлифы использовали при анализе микротвердости покрытия. В качестве образцов использовали образцы из стали 15ХГН2ГА с нанесенными на них покрытиями толщиной 0,6 мм. Для оценки механических свойств, границы соединения и напыленного слоя на исследуемых образцах (рис. 1) измерялась микротвердость.



Рисунок 1 – Общий вид образцов для исследования микротвердости и покрытий.

Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ–3 в соответствии с ГОСТ 9450 – 76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников». Для оценки распределения микротвердости по длине окружности и по глубине, измерения производились согласно схеме на рисунке 2. При измерении микротвердости расстояние от центра отпечатка до края слоя или между центрами соседних отпечатков должно быть не менее трех длин диагоналей отпечатка, минимальная толщина слоя должна превышать глубину отпечатка не менее чем в 10 раз.

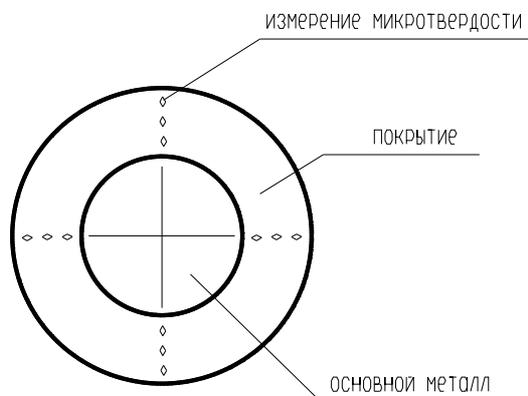


Рисунок 2 - Схема измерения микротвердости

Измерение микротвёрдости покрытия (рис. 3) показало, что средние значения микротвердости у покрытий полученных водородно-кислородным пламенем с 5%

процентной добавкой пропан-бутановой смеси составили: HV 1043 против HV 796 на чистой водородно-кислородной смеси и HV 534 – на ацетилено-кислородном пламени.

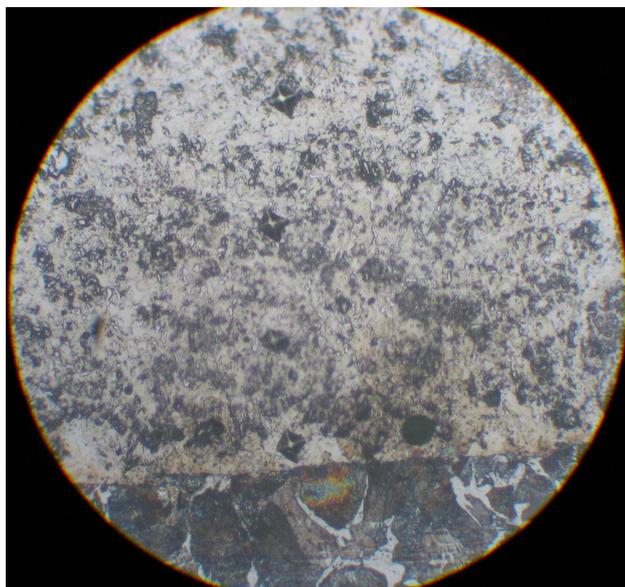


Рисунок 3 – Контроль микротвердости покрытия по высоте

ВЫВОДЫ

Таким образом, применение добавки пропан-бутана к водородно-кислородной смеси для газопламенного напыления позволяет повысить микротвердость получаемых покрытий на 24% в сравнении с покрытиями, получаемыми на чистой водородно-кислородной смеси и на 49% в сравнении с покрытиями, получаемыми на традиционной ацетилено-кислородной смеси (рис. 4).

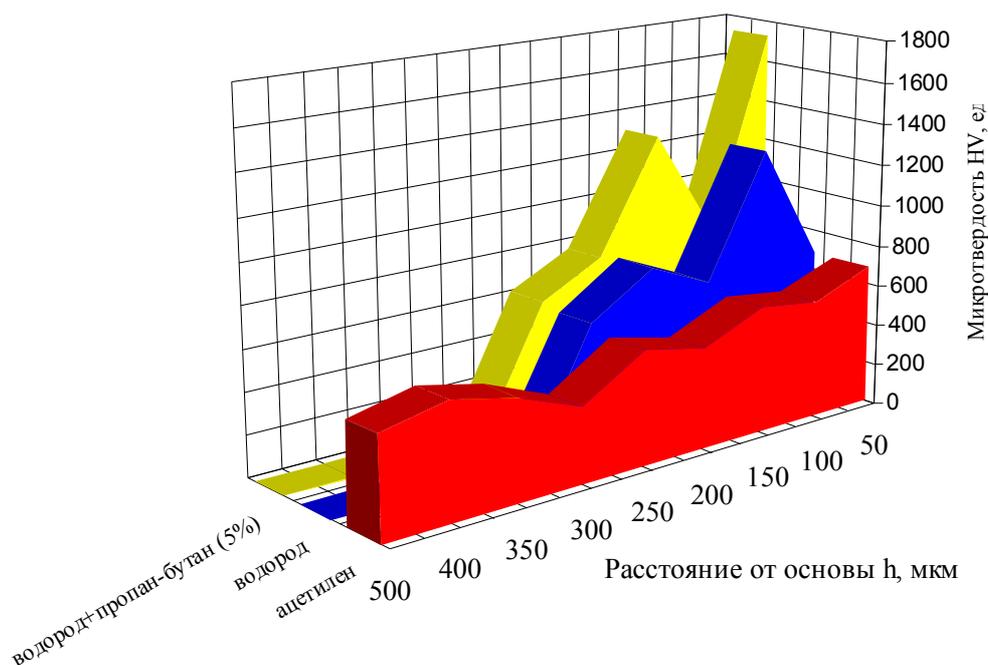


Рисунок 4 – Распределение микротвердости в поверхностном слое газопламенных покрытий полученных напылением порошка ПР-НХ17С4Р4 с использованием пламени различных горючих газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хромов В. Н., Барабаш В. В., Верцов В. В., Корнев В. Н. Газотермическое напыление покрытий с использованием водородно-кислородной смеси.//Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 2-й Международной научно-технической конференции, 28-30 мая 2002г., г. Ялта. – Киев: АТМ Украины, 2002. – 260 с., с.217-220.
2. Хромов В. Н., Дегтярев М. Г., Семешин А. Л., Барабаш В. В., Родичев А. Ю., Корнев В. Н., Зайцев С. А., Блинные Р. Ю., Юрасов С. М., Гончаренко В. В. Упрочнение и восстановление деталей при производстве и ремонте машин.//Научные проблемы и перспективы развития ремонта, обслуживания машин и восстановления деталей: Материалы международной научно-технической конференции, М.: ГНУ ГОСНИТИ, 2003. – 156 с., с.107-115.
3. Хромов В. Н., Мартынов А. Ф., Родичев А. Ю., Барабаш В. В., Верцов В. В., Корнев В. Н. Анализ износного состояния деталей автомобиля КамАЗ и их восстановление газопламенным напылением.//Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». –2004. - №1-2. – 120 с., с.115-120.
4. Хромов В. Н., А. Л. Семешин, И. И. Величкин, В. В. Анненков, А. Ю. Родичев, В. В. Верцов, В. В. Барабаш, В. Г. Верцов, А. Я. Коровин, Н. Г. Абашев, В. Н. Корнев. Разработка и внедрение технологии восстановления и упрочнения деталей газотермическими покрытиями и упругопластическим деформированием на МП «Орелэлектротранс».//Отчет о НИР. Орел: ОрелГАУ № Г.Р. не имеет, 2001.

Василий Николаевич Хромов

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Доктор технических наук, зав. кафедрой «Надежность и ремонт машин», профессор
Тел.: +7(4862)430741
E-mail: chrom@orel.ru

Владислав Николаевич Корнев

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин»
Тел.: +7(910)3047479
E-mail: korenev-vlad@list.ru

Виталий Витальевич Барабаш

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Мастер производственного обучения кафедры «Надежность и ремонт машин»
Тел.: +7(4862)723971
E-mail: vbarabash@list.ru

УДК 621.905

Г.А. МИХАЙЛОВ, В.И. СОТНИКОВ, А.М. ГАВРИЛИН

МНОГОЗАХОДНЫЕ СБОРНЫЕ ЧЕРВЯЧНЫЕ ФРЕЗЫ УМЕНЬШЕННОГО ДИАМЕТРА

Представлены варианты конструкций многозаходных сборных червячных фрез, позволяющих повысить производительность процесса зубонарезания и обеспечивающих возможность управления схемой срезания припуска и кинематическими геометрическими параметрами режущей части зубьев.

Variants of designs многозаходных the modular worm mills are submitted, allowing to raise(increase) productivity of process of cogs thread and providing an opportunity of management the circuit of cutting of an allowance and in kinematic geometrical parameters of a cutting part cogs.

Многозаходные червячные фрезы с большим количеством заходов обеспечивают увеличение производительности при нарезании зубчатых колес. Однако при использовании стандартных цельных многозаходных червячных фрез имеют место следующие особенности:

- увеличение числа заходов приводит к увеличению наружного диаметра фрезы, что увеличивает машинное время зубонарезания из-за большой длины участка врезания;
- увеличение крутящего момента на шпинделе зубофрезерного станка требует использования станков повышенной мощности;
- такие фрезы не позволяют управлять схемой срезания припуска, что сказывается на увеличении износа зубьев;
- нерациональные значения кинематических задних углов на режущих лезвиях снижают стойкость этих фрез;
- необходимость перетачивания по передней поверхности зубьев уменьшает срок службы зуборезного инструмента.

С целью повышения эффективности процесса червячного зубофрезерования и устранения отмеченных недостатков в ОрелГТУ разработаны, изготовлены и испытаны в лабораторных и производственных условиях многозаходные сборные червячные фрезы уменьшенного диаметра.

На рисунке 1 представлена пятизаходная червячная фреза модулем 10 мм. Наружный диаметр такой фрезы равен 186,8 мм. Для сравнения червячная пятизаходная фреза стандартной цельной конструкции модуля 10 мм имеет наружный диаметр 430 мм.

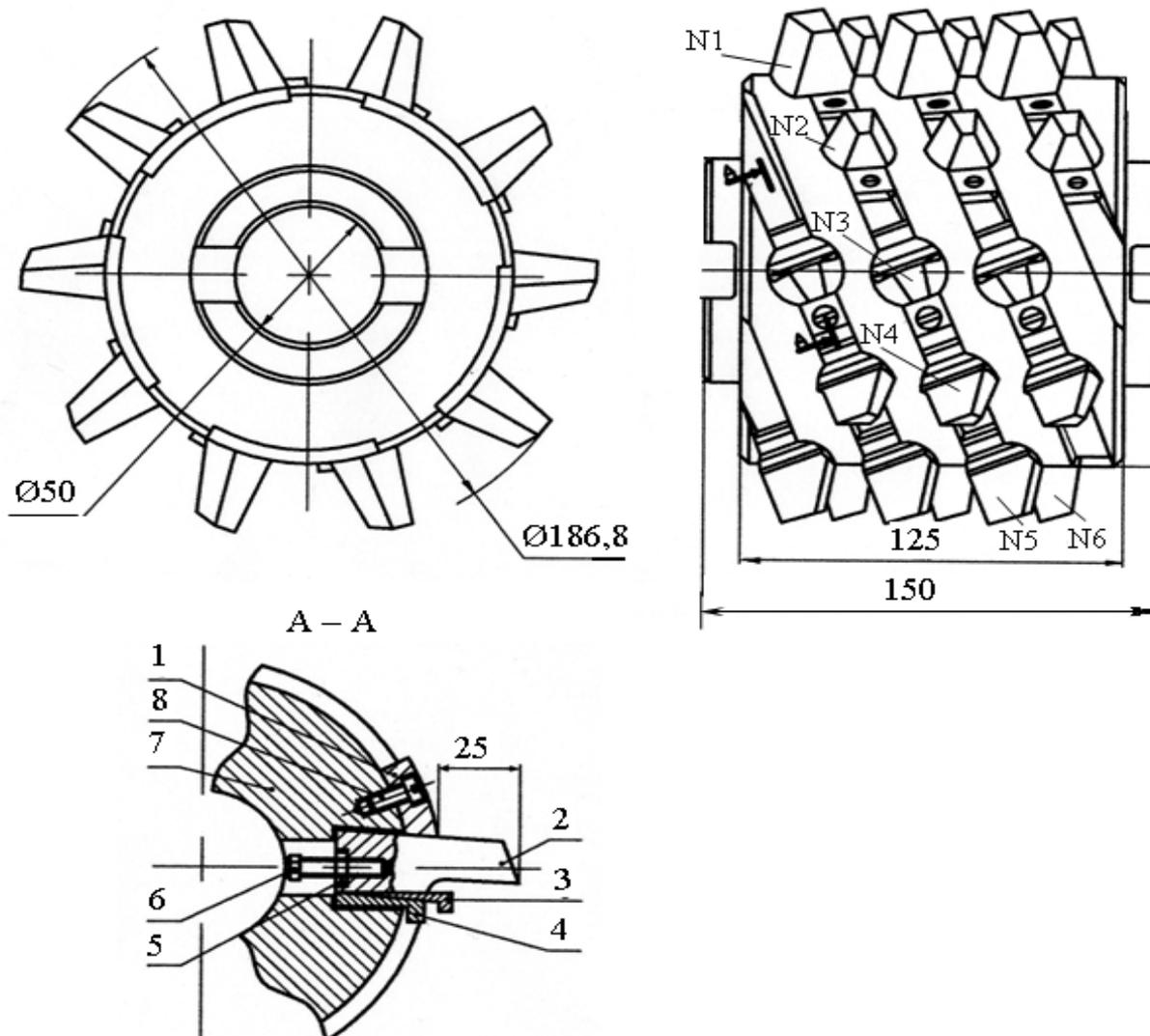


Рисунок 1 – Пятизаходная червячная фреза модуля 10 мм уменьшенного диаметра:
 1 – шпонка; 2 – нож; 3, 4 – клинья; 5 – контргайка; 6 – винт; 7 – корпус; 8 – винт

Фреза состоит из корпуса 7, в котором с помощью клиньев 3 и 4 крепятся тридцать ножей 2, выполненных с цилиндрической державочной частью. Ножи по мере переточки по задним поверхностям можно регулировать по высоте с помощью винта 6, опирающегося на оправку (на рисунке 1 оправка не показана). Контргайка 5 служит для фиксации винта 6. Ориентация ножей 2 относительно оси осуществляется с помощью шпонок 1. Раскрепление ножей фрезы производится перемещением клина 4 к оси инструмента.

На рисунке 1 показаны номера ножей от N1 до N6 одного захода. В этой же последовательности от N1 до N6 ножи вступают в контакт с заготовкой колеса. В каждой радиальной плоскости корпуса фрезы, проходящей через оси отверстий под ножи, расположено по пять ножей, имеющих одинаковую конфигурацию (профиль). Но все шесть ножей, расположенные в различных радиальных плоскостях корпуса фрезы, имеют различный профиль.

Каждая боковая режущая кромка ножа выполнена прямолинейной и касается производящей поверхности фрезы. За счет выбора положения режущих кромок ножей, в том числе и вершинных, можно управлять схемой срезания припуска и схемой профилирования зубьев колеса. Такая червячная фреза относится к инструментам определенного положения.

Цилиндрическая державка ножа фрезы позволяет поворачивать его вокруг оси, что обеспечивает возможность управлять величиной рабочих углов режущего клина, создавая тем самым рациональные условия резания.

При разработке конструкции фрезы использовались различные варианты крепления ножей и их расположения в корпусе. Наиболее рациональным вариантом оказался вариант, при котором ось ножа располагается в радиальной плоскости корпуса фрезы. При таком расположении обеспечивается наибольшее число гнезд под ножи в корпусе.

Отверстия под ножи в корпусе фрезы обрабатывались на координатно-расточном станке. Заточка ножей по задней поверхности производилась в многоместном приспособлении на плоскошлифовальном станке с использованием синусной плиты.

На рисунке 2 представлена одиннадцатизаходная червячная фреза уменьшенного диаметра модулем 4,25 мм.

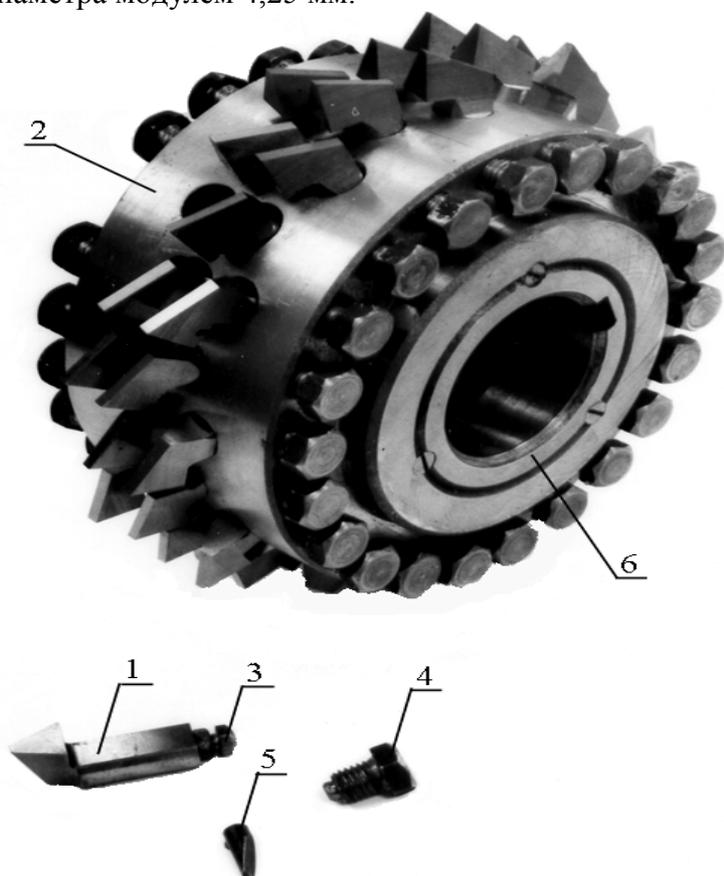


Рисунок 2 –
Одиннадцатизаходная червячная
фреза модуля 4,25 мм
уменьшенного диаметра:
1 – нож; 2 – корпус;
3 – винт регулировочный;
4 – винт; 5 – клин;
6 – втулка

Фреза предназначена для обработки зубчатого венца маховика, имеющего 100 зубьев. В каждом заходе фрезы располагается по четыре ножа. Наружный диаметр фрезы равен 161,9 мм.

Фреза имеет сборную конструкцию. Ножи 1 в количестве 44 штук устанавливаются в радиальных пазах корпуса 2. Ножи могут регулироваться по высоте винтами 3. Винты 3 со сферической головкой опираются на втулку 6, соединенную с корпусом фрезы и выполненную с продольным шпоночным пазом для передачи крутящего момента.

Крепление ножей осуществляется с помощью винтов 4 и клиньев 5. При таком креплении ножи могут иметь выступающую режущую часть и затачиваться по передней поверхности.

При другом варианте конструкции крепления винты 3 позволяют выдвигать ножи из корпуса и затачивать их по задней поверхности в кассетном приспособлении.

В этой фрезе, как и в предыдущей, ножи, расположенные в одной радиальной плоскости корпуса, имеют одинаковый профиль режущей части. Четыре ножа каждого захода имеют различный профиль режущей части, который принимается исходя из равномерной их загрузки и требуемой схемы профилирования впадины зубчатого колеса. Для изготовления и эксплуатации, представленных инструментов, разработаны методики расчета профиля ножей фрезы и определения конструктивных и геометрических параметров [1], а также методика определения размеров срезаемых слоев металла [2, 3].

Испытания сборных червячных фрез уменьшенного диаметра показали их работоспособность, удобство в эксплуатации, а также более высокую производительность и стойкость по сравнению со стандартными цельными многозаходными червячными фрезами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, Г.А. Нарезание цилиндрических колес с внешними зубьями многозаходными фасонными червячными фрезами [Текст] / Г.А. Михайлов, В.И. Сотников, Ю.С. Степанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 176 с.
2. Сотников, В.И. Теория и практика проектирования гибридных зуборезных инструментов [Текст] / В.И. Сотников, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов // Справочник. Инженерный журнал. – 2003, №8, приложение. – С. 13-19.
3. Степанов, Ю.С. Определение размеров срезаемых слоев металла червячной фрезой [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.А. Михайлов, О.Н. Анохин // Справочник. Инженерный журнал. – 1999, №6. – С. 16-18.

Геннадий Александрович Михайлов

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы», доцент

Тел. (4862) 54-14-19

E-mail: asis@ostu.ru

Владимир Ильич Сотников

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, зав. кафедрой «Автоматизированные станочные и инструментальные системы», доцент

Тел. (4862) 54-14-19

E-mail: asis@ostu.ru

Александр Михайлович Гаврилин

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы», доцент

Тел. (4862) 54-14-19

E-mail: asis@ostu.ru

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК – 625.08.0014:613.644

В.С. ВАНИН, О.В. ФОМИНОВА, В.А. ДАНИЛОВ

ОЦЕНКА ВИБРАЦИИ СИДЕНИЙ МАШИН С ГУСЕНИЧНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ В СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ УСЛОВИЯХ

В данной работе проводится анализ и теоретические исследования сглаживания неровностей микропрофилей дороги гусеничными движителями, позволяющие проводить оценки низкочастотных вибраций на рабочих местах машин с гусеничными движителями в стандартизированных условиях.

In the given job the analysis and theoretical researches of smoothing of irregularities of microprofiles of road by the caterpillar locomotors is carried out, allowing to spend estimations of low-frequency vibrations on workplaces of cars with caterpillar locomotors in the standardised conditions.

Основным способом обеспечения вибробезопасности должно быть создание и разработка вибробезопасных машин. Создание таких машин должно обеспечиваться применением технологий, позволяющих снижать уровень вибрации в источнике возбуждения. В методах по ГОСТ /1, 2/ допускается оценивать уровни низкочастотных вибраций при проезде мобильной машины по фактическому микропрофилю. Это связано с субъективным выбором зачетного участка дороги. В этих нормативных документах рекомендуется выбирать зачетный участок дороги без заметных выбоин. Однако, любому измерению присущи ошибки, которые негативно отражаются на объективность оценок исследуемых физических параметров. Поэтому, при моделировании мобильной машины делают общепринятые в статистической динамике допущения, которые показывают, что входной сигнал, вызывающий колебания, полностью определяется профилем пути (допущение основано на том, что колеса сохраняют точечный контакт с профилем дороги). Данные допущения удобно применять лишь для транспортных средств на колесной базе, применение их для гусеничных машин недопустимо, так как в результате движения таких машин будет происходить сглаживание неровностей микропрофиля дороги.

Операция сглаживания фактических неоднородностей микрорельефа почвы необходима в расчетах динамических свойств вибраций машин, движущихся по неровной поверхности. Эта операция отражает уменьшение динамического воздействия на машину за счет того, что движитель опирается одновременно на несколько расположенных рядом микронеровностей. Ее можно рассматривать как осреднение воздействия неровностей. Такое осреднение представлено в общем виде при произвольно заданных размерах неровностей, произвольной неравномерности деформации почвы под движителями и др., а также при упрощениях, принимаемых в практических расчетах.

Измерения микрорельефа почвы представляется в виде стационарной функции высот неровностей вдоль некоторого направления их измерений, $H(x)$ и переводятся в зависимость от времени $H(t)$ преобразованием $x = V \cdot t$, где V - скорость движения вдоль направления x .

Применение Фурье – преобразование к каждой конкретной реализации функции $H(t)$ позволяет получить ее частотный спектр в виде $H(\omega)$, где ω - частота.

Частотные спектры ряда реализаций могут характеризоваться зависимостями математического ожидания и среднеквадратического отклонения функций от частоты $M_H(\omega)$ и $\sigma_H(\omega)$.

$$H(\omega) = M_H(\omega) + \sigma_H(\omega)e^{i\omega t}.$$

Учитывая то, что на динамику машин оказывают влияние лишь отклонения высот микронеровностей от среднего, практический интерес представляют лишь обработки

центрированных величин. В этом случае $H(t)$ характеризуется только частотным спектром

$\sigma_H(\omega)$, т.к. $\dot{M}_H = 0$, где \dot{M}_H - центрированная величина M_H .

Учитывая также, что для стационарной эргодической функции, к которой относят обычно $H(t)$, справедливо $\sigma_H = \sigma$, где σ - среднеквадратическое отклонение высот микрорельефа для одной достаточно представительной реализации.

Получим, как это и принято в методике, что функция $H(t)$ достаточно полно характеризуется зависимостью $\sigma(\omega)$, т.е.:

$$H(\omega) = \sigma(\omega)e^{i\omega t} \quad \text{или после выделения действительной части:} \quad R_e H(\omega) = \sigma(\omega) \cos \omega t \quad (1.1)$$

Представив воздействие микрорельефа почвы на машину в виде входного воздействия $H(t)$ на некоторую динамическую систему, аппроксимирующую поверхность ее движителя, получим, что функция выхода этой системы $Y(t)$ может быть представлена выражением:

$$Y(t) = \begin{cases} y_2(t), & \delta_x > \Delta X, \\ y_1(t), & \delta_x \leq \Delta X, \end{cases}$$

$$Y_1(t) = \frac{2\pi}{\delta_t} \int_t^{t+\delta_t} h(\tau)H(\tau)d\tau, \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} Y_2(t) &= H(t), \\ \delta_t &= \frac{\delta_x}{V}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где δ_x - длина поверхности контакта движителя с почвой (в направлении X);

ΔX - шаг, с которым измеряются характеристики микрорельефа почвы;

$h(\tau)$ - весовая функция, характеризующая вклад отдельных элементов движителя, разнесенных вдоль оси X , в восприятие воздействий почвы на него.

В предположении стационарности и эргодичности случайных воздействий $H(\tau)$ выражение (1.2) преобразуется к виду:

$$Y_1(t) = \frac{2\pi}{\delta_t} \int_0^{\delta_t} h(\tau)H(\tau)d\tau. \quad (1.4)$$

Выражение (1.4) является осреднением воздействий почвы на движитель. Весовая функция $h(\tau)$ связана с распределением давления движителя на почву в пределах его опорной поверхности δ_x . Она может быть получена из функции $h(x)$ при замене $x = V \cdot t$.

Величина $h(x)$ может определяться известными методами.

На рис. 1 представлена схема возможного распределения давления на почву гусеничного движителя. Эпюра давления, нормированная средней его величиной может быть отождествлена с весовой функцией $h(x)$:

$$h(x) = \frac{P(x)}{\frac{1}{\delta_x} \int_0^{\delta_x} P(x)dx}. \quad (1.5)$$

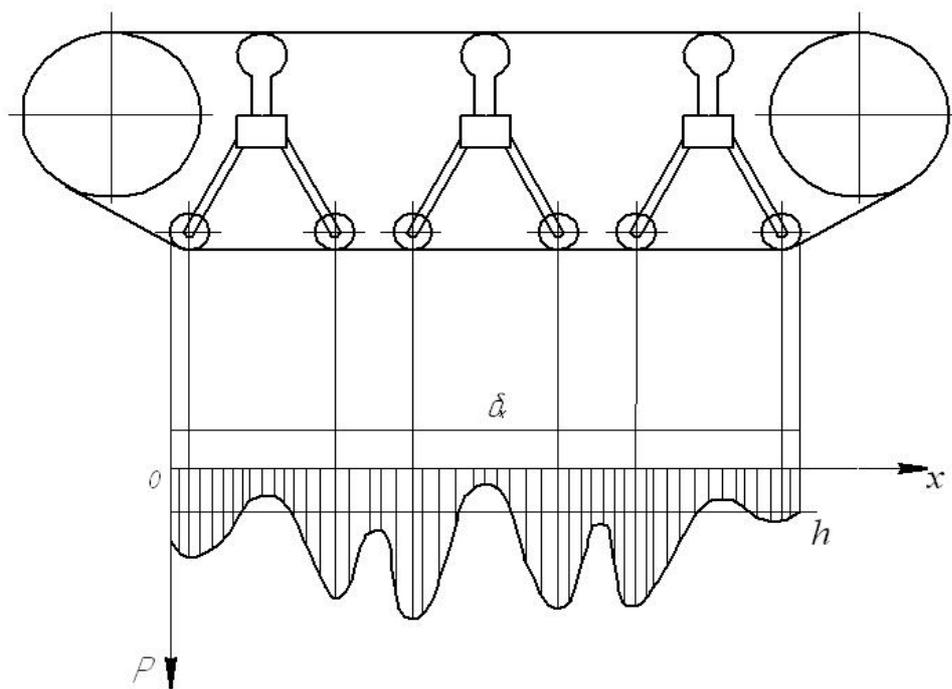


Рисунок 1 – Схема возможного распределения давления на почву гусеничного движителя

Функцию $h(x)$ удобно представить для дальнейших преобразований в виде стационарной и переменной составляющих:

$$h(x) = \bar{h} + h'(x), \quad \text{причем} \quad \bar{h} = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq \delta_x, \\ 0, & x < 0; x > \delta_x, \end{cases} \quad \text{или при подставке } x = V \cdot t: \\ h(t) = 1 + h'(t) \quad (1.6)$$

Подставив (1.6) в (1.4), получим,

$$Y_1(t) = \frac{2\pi}{\delta_t} \int_0^{\delta_t} H(\tau) d\tau + \frac{2\pi}{\delta_t} \int_0^{\delta_t} H(\tau) h'(\tau) d\tau. \quad (1.7)$$

Первый член в (1.7) соответствует простому осреднению воздействий микрорельефа почвы на опорную поверхность движителя (без учета относительного вклада отдельных его элементов в восприятие воздействий); второй член можно интерпретировать как поправку, обусловленную неравномерностью восприятия отдельными элементами движителя воздействий почвы.

Подставив (1.1) в (1.7) получим для каждой частоты из спектра $\sigma(\omega)$:

$$R_e Y_1(\omega) = \frac{\sigma(\omega)}{f \cdot dt} \sin \omega \delta_t + \frac{\sigma(\omega)}{f \cdot dt} \int_0^{\delta_t} \cos \omega \tau \cdot R'(\tau) d(\omega \tau), \quad (1.8) \\ f = \frac{\omega}{2\pi}.$$

Таким образом, частотный спектр воздействия микрорельефа почвы на мобильную машину, преобразованного ее движителем, представлен в виде суммы двух спектров. Первый из них характеризуется первым членом выражения (1.8), соответствующим

простому осреднению неровностей по площади контакта грунта с движителем, а второй представляет собой спектр-поправку, вызванную неравномерностью в пределах этой площади давления движителя на почву.

Поправка стремится к нулю при $\delta_t \rightarrow \infty$ или при $h'(\tau) \rightarrow 0$, или при $\cos \omega h' \tau \rightarrow 0$ вследствие случайного характера воздействий $H(t)$.

Первый член выражения (1.8) также может принимать нулевые значения (это соответствует отсутствию воздействия почвы на машину на данной частоте) на частотах f , находящихся в следующей связи с длиной опорной поверхности движителя δ_x и скоростью V движения машины:

$$\frac{f\delta_x}{V} = n,$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

При промежуточных значениях этого критерия он принимает экстремальные значения.

Движитель сглаживает (интегрирует) воздействие микронеровностей почвы таким образом, что среднеквадратичные отклонения воздействий уменьшаются в среднем соотношении:

$$\sigma = \frac{\sigma(\omega)}{f\delta_t}, \quad \delta_x > \Delta X,$$

$$\sigma = \sigma(\omega), \quad \delta_x \leq \Delta X,$$
(1.9)

при наличии поправки, определяемой вторым членом уравнения (1.8).

Представленные характеристики микрорельефа почвы должны использоваться в задачах динамики машин после их преобразования в соответствии с выражением (1.8) или приближенно – в соответствии с (1.9).

Если в экспериментальных исследованиях получены некоторые динамические характеристики линейной системы, вызванные движением по почве с фактическими микронеровностями, определяющимися величиной σ_ϕ , они могут приводиться к типовому микрорельефу по выражению:

$$B_n(\omega) = B(\omega) \frac{\sigma}{\sigma_\phi},$$
(1.10)

где $B_n(\omega), B(\omega)$ – частотные спектры динамических характеристик, например вибраций, приведенные к типовым условиям и фактические.

Формула (1.10) сохраняет вид независимо от характеристик движителя.

Таким образом, получены зависимости для преобразования характеристик микрорельефа почвы движителями машин (гусеничных). Они предназначены для исследования их динамики, а также для расчетов низкочастотных вибраций на рабочем месте оператора по измеренным реакциям на ступенчатое возмущение.

Приведенные зависимости необходимо применять для оценки сглаживания микрорельефа гусеничными движителями. Не учет сглаживания движителями машин микропрофилей приводит к большим погрешностям при оценке уровней вибрации на рабочих местах операторов мобильных машин. Так в работе [3] экспериментально рассмотрена сложная задача о сглаживании круглым колесом микропрофиля испытательного стенда. Неровности стенда образованы прямоугольными и более сложными металлическими пластинами, которые не могут копироваться ни одним реальным движителем и поэтому неизбежно создают возмущения, отличающиеся от геометрического профиля, что приводит к ошибкам при оценках вибрации.

Использование полученных зависимостей преобразующих характеристики микропрофиля гусеничными движителями машин при оценках низкочастотных вибраций

сидений транспортных средств по измеренным реакциям на ступенчатое возмущение /4/ повышают объективность и воспроизводимость результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Межотраслевая методика испытаний тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин по оценке уровня низкочастотной вибрации на рабочем месте механизатора // ГОНТИ НАТИ. – М., 1980. – 27 с.
2. РД 22-32 – 80. Машины строительные и дорожные. Определение эргономических показателей. Введен 01.07.81. – М. 1980. – 93 с.
3. Ванин В.С., Данилов В.А., Бузуев В.С. Новый метод оценки транспортной вибрации мобильных машин. // Строительные и дорожные машины. - 2007. - №12.
4. Ванин В.С., Галаган Т.В. Метод использования переходных функций при оценке транспортной вибрации. // Строительные и дорожные машины. - 2007. - №3.

Владимир Семенович Ванин

Орловский государственный технический университет, г.Орел
Кандидат технических наук, декан факультета «Легкая промышленность»
Тел. (4862)
E-mail: mapp@ostu.ru

Ольга Владимировна Фоминова

Орловский государственный технический университет, г.Орел
Кандидат технических наук, доцент, кафедра «Теоретическая механика»
Тел. (4862) 419849

Виталий Александрович Данилов

Орловский государственный технический университет, г.Орел
Студент факультета «Легкая промышленность»
Тел. 89192687390
E-mail: dan_vitalik@rambler.ru

УДК 621.822.6-97: 621.317.757.08

ДАВЫДОВА Н.В., КОРНДОРФ С.Ф., НОГАЧЁВА Т.И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНОЙ ЯЧЕЙКИ МЕТОДОМ ВОЛЬТМЕТРА-АМПЕРМЕТРА

Показана возможность применения модифицированного метода вольтметра-амперметра для исследования параметров емкостной ячейки. Описан выбор оптимального образцового сопротивления измерительной схемы, при котором ошибка измерения минимальна.

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.

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. Разновидностью этого метода является измерение напряжений на входе измерительной цепи и поочередно на двух омических эталонных сопротивлениях [3].

Реализация метода амперметра-вольтметра 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 .

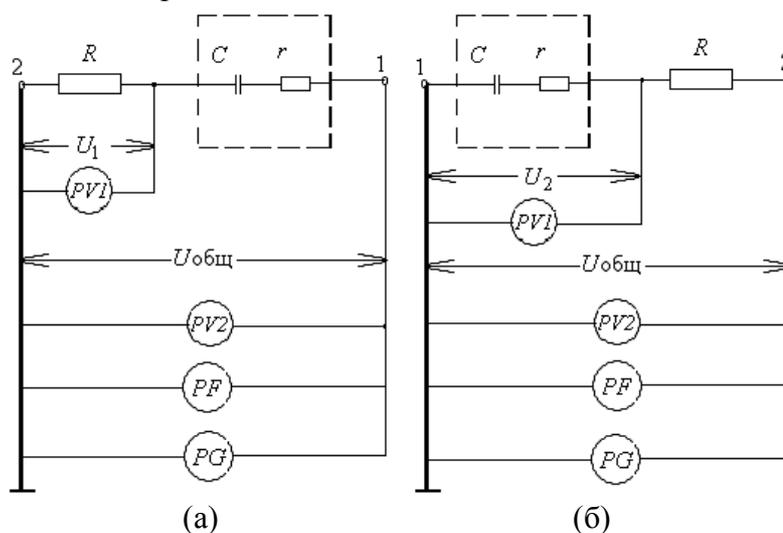


Рисунок 1 – Схемы измерения параметров емкостной ячейки, методом двух вольтметров:
 (а) схема измерения напряжения на образцовом резисторе,

(б) схема измерения напряжения на исследуемой ячейке

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.

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:

$$I = \frac{U_1}{R}, \quad (1)$$

$$I = \frac{U_2}{\sqrt{r^2 + x^2}}, \quad (2)$$

$$I = \frac{U_{\text{общ}}}{(R+r)^2 + x^2}, \quad (3)$$

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:

$$r = \frac{1}{2} \cdot R \cdot \left(\frac{U_{\text{общ}}^2}{U_1^2} - \frac{U_2^2}{U_1^2} - 1 \right). \quad (4)$$

$$x = R \cdot \sqrt{\left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{U_{\text{общ}}^2}{U_1^2} - \frac{U_2^2}{U_1^2} - 1 \right)^2}. \quad (5)$$

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

$$\frac{S_{\text{отн}}}{S_{\text{отн макс}}}$$

$$\xi = \frac{S_{\text{отн}}}{S_{\text{отн макс}}} = \frac{2 \cdot \frac{x}{r} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{x}{r} - 1\right)\right)}{\left[1 + \alpha \cdot \left(\frac{x}{r} - 1\right)\right]^2 + \left(\frac{x}{r}\right)^2}, \quad (13)$$

где $\alpha = \frac{R}{R_{\text{опт}}}$. (14)

Зависимости коэффициента ξ от α при различных значениях отношения $\frac{x}{r}$ приведены на рисунке 2.

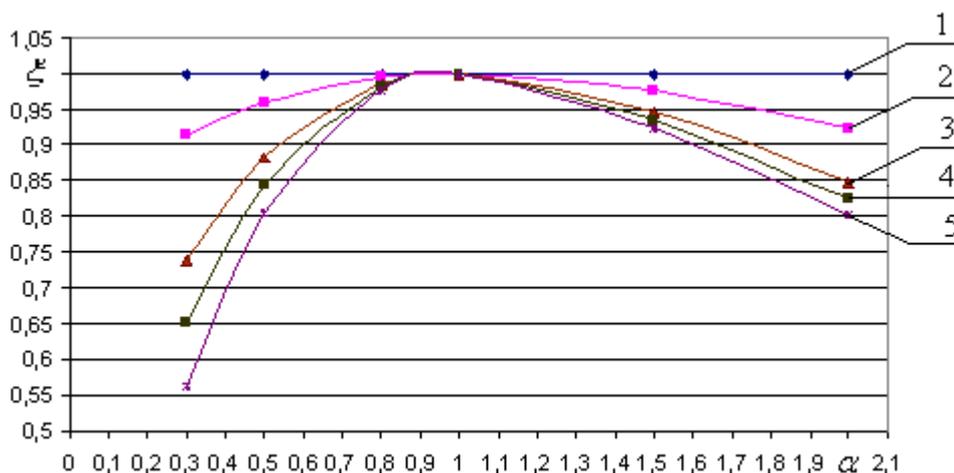


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента ξ от α при различных значениях отношения $\frac{x}{r}$:

$$1 - \frac{x}{r} = 1, 2 - \frac{x}{r} = 2, 3 - \frac{x}{r} = 5, 4 - \frac{x}{r} = 10, 5 - \frac{x}{r} = 100$$

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.

ЛИТЕРАТУРА

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. – 464 с.
3. Калинин, В.В. Способ и устройство для измерения сопротивления водных электролитов [Текст] / В.В. Калинин, А.В. Казак // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2008. – № 8. – Том 74. – С.46-48.

Надежда Владимировна Давыдова

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»,
Тел. (0862)419876
E-mail: pms@ostu.ru

Сергей Фердинандович Корндорф

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Доктор технических наук, профессор кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (0862)419876
E-mail: pms@ostu.ru

Татьяна Ивановна Ногачёва

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Кандидат технических наук, доцент
Тел. (0862)419876
E-mail: pms@ostu.ru

УДК. 006.91:615.47]:004.91

ЕГОРОВ Б.А., КОЗИЮРА А.В., ПОДМАСТЕРЬЕВ К.В., СЕМИН А.А., ЯКОВЕНКО М.В.

ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПОВЕРКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОАППАРАТУРЫ

Рассмотрена проблема метрологической поверки электрокардиоаппаратуры. Предложены пути многократного снижения трудоемкости поверки за счет ее автоматизации. Разработан и апробирован универсальный автоматизированный комплекс для поверки.

Examined a problem of electro-cardio appliances verification. Proposed means of multiple verification laboriousness decreasing by its automation. Developed and tested universal automated verification system.

Состояние вопроса, постановка задач исследования. Самый массовый вид медицинских диагностических приборов – это электрокардиоаппаратура (ЭКП) – электрокардиографы, электрокардиоскопы и электрокардиоанализаторы, применяемые для диагностики сердца. Значение таких приборов для общей диагностики чрезвычайно велико, имея в виду, что до 80 % населения в России в той или иной степени страдают заболеваниями, связанными с сердцем и, по широко известной статистике, причиной примерно 70 % всех смертей является отказ сердца. При этом один ЭКП приходится примерно на 1000 человек населения.

Вместе с тем, метрологическая поверка ЭКП, проводимая не реже одного раза в год территориальными органами государственной метрологической службы (государственными региональными центрами метрологии) или организациями, аккредитованными на право выполнять поверку, представляет собой вполне определенные организационные и

технические трудности, связанные с регламентированной ГОСТ Р 50.2.009-2001 [1] методикой выполнения поверки (далее Методика) и особенностями применяемого для этого оборудования.

Суть проводимой по существующей Методике поверки заключается в сравнении записанных на бумажный носитель проверяемым ЭКП ряда тестовых сигналов, поданных на его вход специальным образцовым генератором, с нормативами, установленными для определенных точек записей. При этом форма тестовых сигналов весьма сложна (близка к типовой кардиограмме) и содержит несколько сотен амплитудных и временных показателей, для определения и сравнения которых возникает необходимость в использовании примитивных средств измерения (линейка, штангенциркуль, лупа и т.п.), в вычислении множества показателей, в записи измеренных и вычисленных показателей в многочисленные таблицы и в оформлении соответствующей выходной документации. В результате поверитель вынужден затрачивать несколько часов на поверку только одного, даже самого простого одноканального ЭКП. При поверке многоканальных ЭКП трудоемкость поверки еще больше.

Организационно проблема поверки ЭКП осложнена и тем, что электрокардиоаппаратура не сконцентрирована в одном или нескольких центрах, а рассредоточена по всей территории региона, в сотнях лечебно-профилактических учреждений, что требует дополнительных транспортных и временных затрат для получения специалистом возможности их поверки. К тому же, количество используемых в России для поверки ЭКП генераторов (рекомендованный в Методике генератор ГФ-05 и его аналоги) явно недостаточно. Например, в Орловской области таких генераторов всего два, один из которых в ФГУ «Орловский ЦСМ» используется для поверки ЭКП, а другой – в ОГУП «Медтехника» используется при ремонте ЭКП. В других областях и регионах ситуация аналогична.

Кроме того, следует отметить, что такой важный показатель, как толщина линии записи, изменяющаяся при записи кардиограммы из-за различных технических причин, по существующей Методике вообще не исследуется, хотя от того, какую границу линии записи принять за исходную, может во многом зависеть результат поверки аппаратуры, а следовательно и достоверность диагностирования этой аппаратурой пациента.

И еще одно соображение. Существенный интерес представляет возможность оценки текущего состояния ЭКП в рамках технического обслуживания аппаратуры при ее эксплуатации в периоды межповерочных интервалов силами инженерно-технических работников лечебно-профилактических учреждений, эксплуатирующих ЭКП. Это позволило бы проводить предповерочную подготовку аппаратуры, выполнять контроль ее состояния «на местах» в случае сомнений в правильности работы, что, несомненно, существенно повысило бы достоверность диагностирования пациентов на этой аппаратуре. В то же время, существующее техническое и методическое обеспечение метрологической оценки состояния ЭКП, используемое при поверке, в виду большой трудоемкости оценки, сложности (высокой стоимости и уникальности) применяемого оборудования и потребности высокой квалификации исполнителя не может быть использовано для решения указанной задачи.

Таким образом, назрела необходимость в усовершенствовании существующей системы поверки ЭКП, причем не только в техническом, но и организационно-методическом плане, с целью существенного снижения трудоемкости поверки, создания условий для возможности оценки состояния ЭКП в рамках технического обслуживания аппаратуры. На решение данной проблема и направлена многолетняя работа кафедры приборостроения, метрологии и сертификации ОрелГТУ.

Цель работы – создание инструментальной базы и совершенствования Методики метрологической поверки ЭКП в направлении автоматизации и повышение качества поверочных работ с использования современных информационных технологий.

Задачами работы являются:

1. Разработка инструментальной базы, обеспечивающей комплексную автоматизацию процесса поверки, включая разработку высокотехнологичного программного генератора тестовых сигналов;
2. Расширение показателей проверяемых при проведении поверки показателей;
3. Корректировка и аттестация Методики поверки.

Основная идея разработки заключается в создании универсального программно-аппаратного комплекса для метрологической поверки любых ЭКП. В этом комплексе предлагается реализовать следующий подход:

- формировать тестовые сигналы с помощью «виртуального» генератора тестовых сигналов, созданного на базе персонального компьютера на основе современных информационных технологий;
- подавать тестовые сигналы через универсальное устройство сопряжения на поверяемый ЭКП;
- результаты, записываемые на штатный носитель информации поверяемым ЭКП, автоматически оцифровывать в соответствующем устройстве, «очищать» от масштабной сетки и других артефактов, «распознавать» по границам и толщине линии записи и т.п.;
- оцифрованные сигналы программным путем маркировать по заданным точкам, производить автоматический расчет метрологических характеристик проверяемых параметров, в соответствии с принятой Методикой;
- формировать результаты поверки и выводить их в удобной для протоколирования и дальнейшего анализа форме.

В настоящей статье представлены некоторые из достигнутых на настоящий момент времени результатов в рамках поэтапной реализации поставленных выше задач.

На рисунке 1 представлена структурная схема разработанного комплекса для поверки ЭКП. Комплекс создан на базе персонального компьютера ПК в комплекте с принтером и сканирующим устройством СУ. Для подключения ПК к поверяемому ЭКП служит универсальное устройство сопряжения УУС. Формирование тестового сигнала осуществляется программным виртуальным генератором ГТС-В, а обработка записанных ЭКП диаграмм после сканирования и сравнение этого сигнала с тестовым сигналом от ГТС-В – модулем обработки сигнала МОС.

Генератор тестовых сигналов (ГТС-В) создан на основе продукта компании National Instruments – LabVIEW 8 на базе персонального компьютера ПК [2]. Лицевая (интерфейсная) панель генератора ГТС-В представлена на рисунке 2. Генератор создает сигналы с установленной Методикой формы и необходимыми временными и амплитудными параметрами в поверяемых точка для всех отведений ЭКП.

Универсальное устройство сопряжения (УУС) решает проблему согласования уровней сигнала с выхода ПК и сигнала, необходимого для подачи на вход поверяемого ЭКП согласно Методике поверки. Данное устройство может быть выполнено на базе серийно выпускаемых блоков, например, фирмы National Instruments. В разработанном комплексе используется плата сбора данных NI USB-6009.

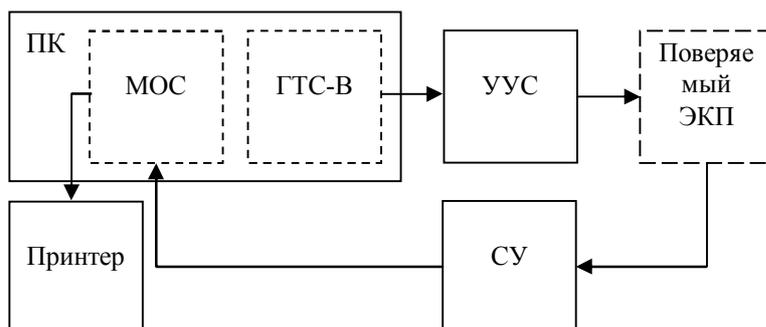


Рисунок 1 – Структурная схема универсального комплекса для поверки ЭКП



Рисунок 2 – Лицевая (интерфейсная) панель ГТС-В

Модуль обработки сигнала (МОС).

Особую сложность представляет проблема оцифровки сигнала. Она обусловлена тем, что различные типы и модификации ЭКП используют различные по видам и геометрическим размерам носители, при этом на носителях имеет место координатная сетка, которая, будучи необходимой для анализа кардиограммы и поверки ЭКП по принятой Методике, является определенной помехой при оцифровке сигнала и его последующем использовании в автоматизированном режиме поверки.

Для решения этой проблемы исследована возможность использования современных технологий для анализа записанного на любой тип бумажного носителя сложного сигнала, имеющего метрологические характеристики. Для этого разработаны алгоритмы: распознавания границ линии сигнала; удаления масштабной сетки с оцифрованного изображения бумажного носителя с записанным сигналом; измерения основных параметров и расчета метрологических характеристик. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Фактический линейный размер на цифровом изображении определяется количеством точек и разрешением оцифровки:

$$l_{\text{факт}} = n / \text{res} , \tag{1}$$

где $l_{\text{факт}}$ – фактический линейный размер изображения, дюйм;

n – количество точек;

res – разрешение оцифровки, точек/дюйм.

Для перевода размера в миллиметры в формулу (1) необходимо ввести коэффициент пропорциональности:

$$l_{\text{мм}} = 25,4 \cdot n / \text{res} , \tag{2}$$

где $l_{\text{мм}}$ – фактический линейный размер изображения, мм.

С учетом выше изложенного рассчитаны и сформулированы минимальные требования к устройствам, способным оцифровывать с заданной точностью записанный сигнал и передавать его для дальнейшей обработки. Так как Методика поверки ЭКП устанавливает измерение линейных размеров с точностью до 0,1 мм, то минимальное разрешение оцифровки должно быть 254 точек на дюйм, что позволяет в качестве аппаратной базы для реализации устройства оцифровки сигнала использовать серийно выпускаемые сканеры (СУ) с разрешением сканирования до 2400 DPI [3].

Также необходимым условием является сохранение результатов сканирования в форматах сжатия изображения без потерь, например BMP или PNG. Цветность изображения

должна быть не менее 8 бит (256 градаций серого), оптимальное значение цветности – 24 бита.

В качестве примера реализации работы разработанных алгоритмов на рисунке 3 приведено оцифрованное изображение стандартного сигнала отведения I, записанного на термобумагу современным ЭКП – GEMS IT MAC 1200.

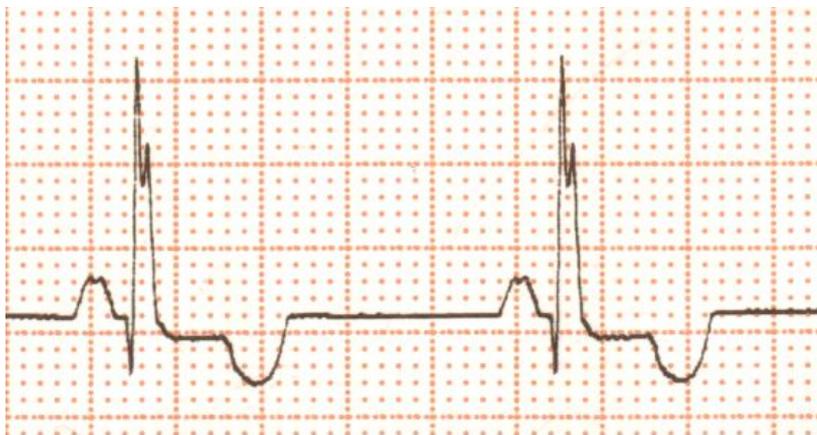


Рисунок 3 – Пример оцифрованного изображения сигнала

Если представить матрицу изображения как $M(x, y)$, где x и y – координаты точек цифрового изображения (пикселей), то для определения градиента интенсивности ее необходимо преобразовать в матрицу интенсивности $I(x, y)$. Для построения этой матрицы учтем, что интенсивность цвета точки цифрового изображения является аналогом яркости. В соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи (ITU) ее можно вычислить, используя формулу, разработанную Национальным комитетом по телевизионным стандартам (NTSC) и Интернациональной комиссией по освещению (CIE 1931):

$$Y = 0,288 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B, \quad (3)$$

где Y – интенсивность;
 R – составляющая красного цвета;
 G – составляющая зеленого цвета;
 B – составляющая синего цвета.

Таким образом, получим формулу для построения матрицы интенсивности изображения:

$$I(x, y) = 0,288 \cdot M(x, y)_R + 0,587 \cdot M(x, y)_G + 0,114 \cdot M(x, y)_B. \quad (4)$$

Построенная в соответствии с (4) матрица интенсивности изображения, представлена на рисунке 4а. Анализ гистограммы интенсивности точек полученного изображения (рисунок 4б), показывает, что имеет место два максимума. Точки, лежащие в окрестности первого максимума, являются точками линии сигнала, а точки, лежащие в окрестности второго максимума, являются точками масштабной сетки. Причем данное утверждение верно для записей с любой цветностью масштабной сетки.

Таким образом, для удаления информации о масштабной сетке необходимо все точки, обладающие значением интенсивности выше некоторого порогового числа сделать белыми. Наилучшие результаты получаются при пороговой интенсивности, равной среднему первого и второго максимумов.

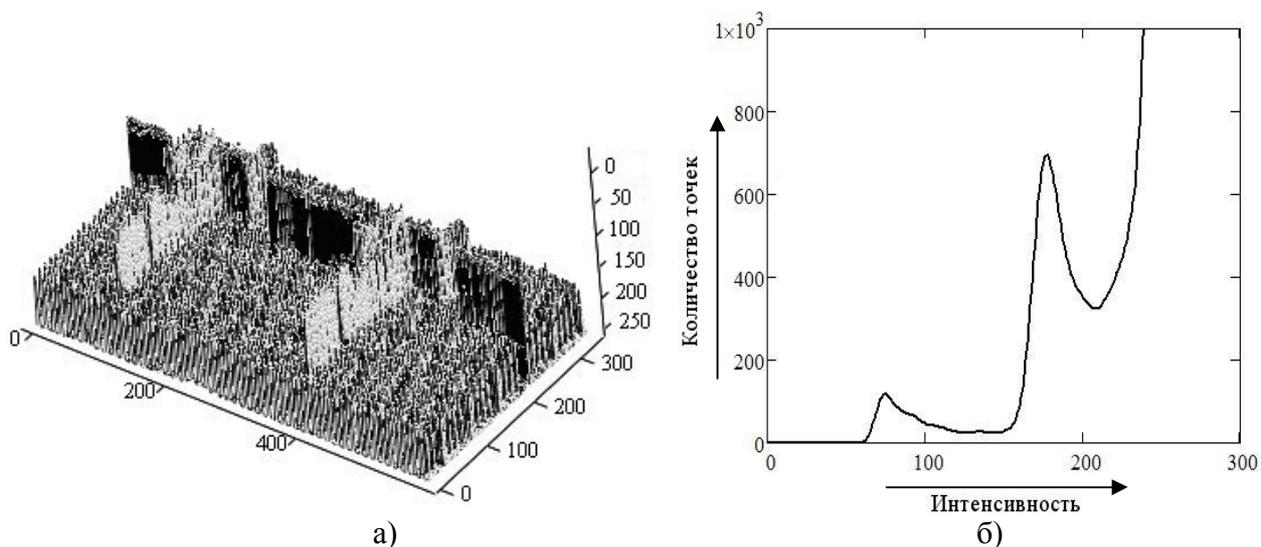


Рисунок 4 – Матрица интенсивности изображения (а), гистограмма интенсивности точек изображения (б)

Для нахождения значений максимумов необходимо сгладить линию гистограммы. Для этого предлагается использовать метод Гауссова ядра

$$sm_i = \frac{\sum_{j=i-\frac{b}{2}}^{i+\frac{b}{2}} \left(K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right) \cdot y_j \right)}{\sum_{j=i-\frac{b}{2}}^{i+\frac{b}{2}} K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right)}, \quad (5)$$

где, sm_i – значение i -ой сглаженной точки гистограммы;

b – ширина окна сглаживания;

x_i, x_j – значение интенсивности в точках i, j ;

y_j – количество точек с интенсивностью x_j ;

$$K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0.37} e^{\left(-\frac{t^2}{2 \cdot 0.37^2}\right)}.$$

В точках, где производная меняет знак с плюса на минус, будут находиться значения максимумов. Итак, значение пороговой интенсивности – среднее значение между первым и вторым максимумом.

Далее найдем матрицу градиента интенсивности $G(x, y)$, вычисляя только вертикальный градиент, так как вычисление горизонтального градиента не является эффективным.

$$G(x, y) = \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \quad (6)$$

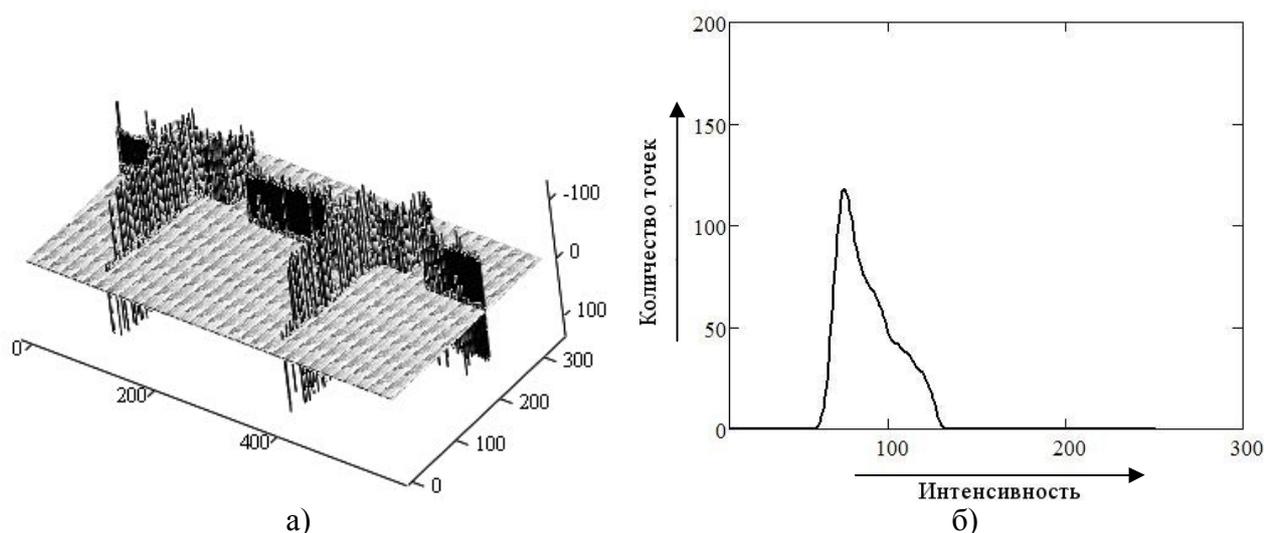


Рисунок 5 – Матрица интенсивности градиента после удаления масштабной сетки (а) и гистограмма интенсивности точек после удаления масштабной сетки (б)

Найти координату границ линии поверочного сигнала не составит труда, т.к. градиент в точках края будет иметь максимальное или минимальное значение.

Таким образом, применения выше описанного алгоритма позволяет определить координаты верхней и нижней границы линии тестового сигнала.

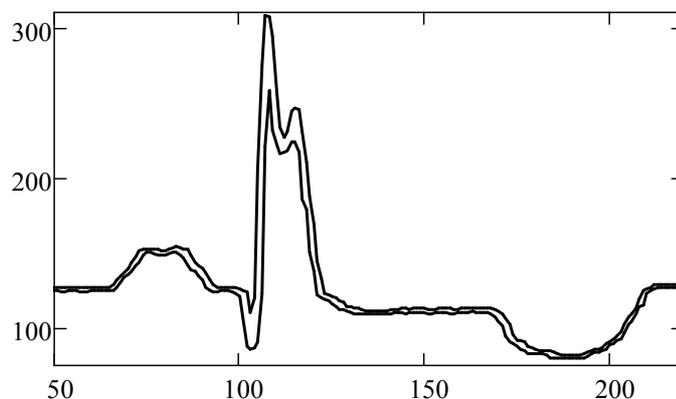


Рисунок 6 – Матрица точек границ сигнала, представленного на рисунке 3

Разработан соответствующий программный продукт для обеспечения автоматического распознавания в соответствии с выше изложенным алгоритмом, расстановки маркеров в определенных точках и расчета по ним контролируемых параметров. Данный продукт создан с помощью технологии Microsoft .Net Framework, которая позволяет применять в процессе разработки последние достижения в области объектно-ориентированного программирования, обеспечивает быстроту разработки, отладки и портирования программного продукта на другие платформы (GNU/Linux, Windows CE) [3].

Пример работы программы с изображением вычисленных границ и расставленных в контролируемых согласно [1] точках сигнала (стандартное отведение I) маркеров представлен на рисунке 7, а пример отчета для данного случая – на рисунке 8.

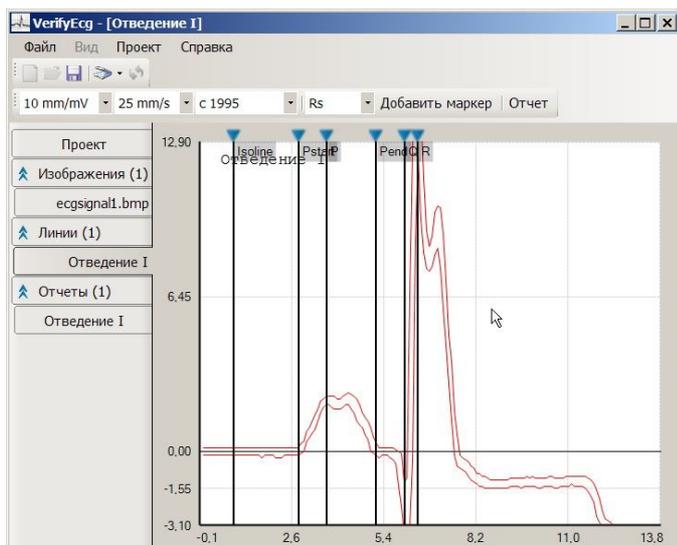


Рисунок 7 – Пример расстановки маркеров

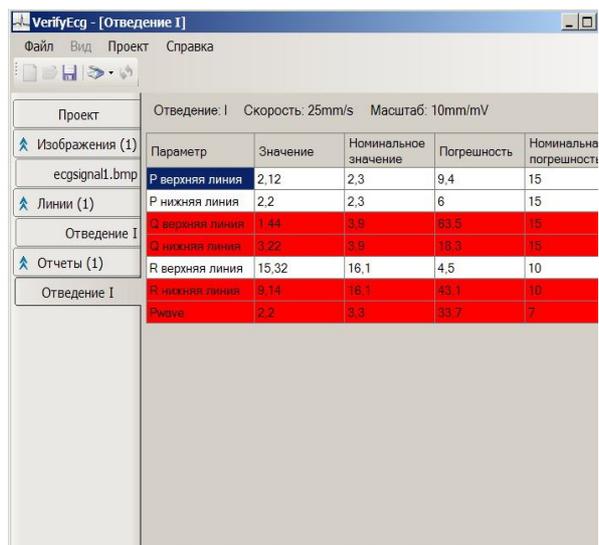


Рисунок 8 – Вид отчёта

Проведено опытно-промышленное опробование разработанного комплекса на базе ОГУП «Медтехника», результаты которого подтвердили его работоспособность и существенное снижение трудоемкости процедуры поверки. В частности установлено, что время поверки метрологических характеристик электрокардиографам типа ЭК1Т-03М2 составило около 5 мин.

Выводы:

1. Предложены направления усовершенствования системы метрологической поверки электрокардиоаппаратуры, обеспечивающие существенное снижение трудоемкости и стоимости поверочных работ за счет их комплексной автоматизации и создающие условия для организации объективной оценки состояния аппаратуры при проведении технического обслуживания в процессе ее эксплуатации силами технических работников ЛПУ.
2. Разработан и апробирован универсальный программно-аппаратный комплекс для поверки электрокардиоаппаратуры, обеспечивающий многократное снижение трудоемкости поверочных работ при выполнении требуемых технических характеристик.
3. Для завершения работ необходимо провести организационно-правовые мероприятия по утверждению типа средства измерения на разработанный комплекс для поверки ЭКП и по аттестации усовершенствованной методики поверки.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 50.2.009-2001 Рекомендации по метрологии. Электрокардиографы, электрокардиоскопы, электрокардиоанализаторы. Методика поверки. [Текст]. Взамен МИ 2398-97; введен 2002-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 30 с. – (Государственная система обеспечения единства измерений)
2. Егоров Б.А. Использование информационных технологий для автоматизации метрологической поверки электрокардиоаппаратуры [Текст]/ Б.А. Егоров, А.В. Козюра, М.В. Яковенко // Известия ОрелГТУ. Информационные системы и технологии, 2008. – Т. 1. – С. 56-61.
3. Егоров, Б.А. Автоматизация метрологической поверки электрокардиоаппаратуры [Текст]/ Б.А. Егоров, А.В. Козюра, М.В. Яковенко // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: Труды XVII Международного научно-технического семинара. Алушта, сентябрь 2008 г. – СПб.: ГУАП, 2008. – С. 74.

Борис Александрович Егоров

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
 Тел.(4862)41-98-76

E-mail: pms35@ostu.ru

Алексей Вячеславович Козюра

Орловский государственный технический университет, г. Орел
студент
Тел.(4862)41-98-76
E-mail: aleksei.vk@gmail.com

Константин Валентинович Подмастерьев

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Заведующий кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел.(4862)41-98-21
E-mail: asms-orel@mail.ru

Александр Акимович Семин

ОГУП «Медтехника», г. Орел
Заместитель начальника ремонтно-сервисного участка
Тел. (4862)41-34-68

Михаил Викторович Яковенко

Орловский государственный технический университет, г. Орел
аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел.(4862)41-98-76
E-mail: pms35@ostu.ru

УДК 620.179.1.082.7:658.58

М.Г. ЗАХАРОВ

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТРИБОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ ЭЛЕКТРОПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Отмечены особенности диагностирования рабочих поверхностей пар трения электропараметрическими методами при воздействии помех. Рассмотрены погрешности диагностирования, вызванные источниками помех, имеющими различную физическую природу. Указаны достоинства и недостатки основных схем замещения пар трения, сделаны выводы.

Features of diagnosing of working surfaces of pairs friction are marked by electro parametrical methods at influence of handicaps. The errors of diagnosing caused by sources of handicaps, having the various physical natures are considered. Merits and demerits of the basic equivalent circuits of pairs friction are specified, conclusions are made.

Введение

Трибосистемы различного назначения и конструктивного исполнения в эксплуатационных условиях в связи с особенностями процессов контактного взаимодействия их рабочих поверхностей генерируют ЭДС составляющие, которых носят сложный характер и имеют различную физическую природу. Кроме того, внешние, например индустриальные источники создающие мощные электромагнитные помехи в широком частотном диапазоне являются причиной дополнительных составляющих ЭДС наводимых в трибосистеме.

Использование электропараметрических методов для диагностирования трибосистем основывается на представлении их зон трения электрической схемой замещения

эквивалентной протекающим в ней процессам. При этом наиболее часто в связи со своей простотой используется одноэлементная схема, базирующаяся на представлении зоны трения активным сопротивлением r_0 или проводимостью g_0 , параметры которого характеризуют ее состояние и носят флуктуационный характер [1].

Трибосистема при использовании электропараметрических методов включается в единый контур со средством диагностирования. Источник электрической энергии, реализованный в виде генератора тока или напряжения и встроенный в средство диагностирования, является его неотъемлемой частью, и создает тестовое электрическое воздействие на объект диагностирования. Ток, протекающий в образованном измерительном контуре, несет информацию о состоянии трибосопряжения, а его параметры используются в качестве диагностических признаков. Однако при диагностировании трибосопряжения в эксплуатационных условиях через измерительную цепь проходит суммарный ток, вызванный не только источником тестового воздействия, составляющие которого, связаны с изменением сопротивления r_0 или проводимости g_0 зоны трения, но и токи, составляющие которых, генерируются самой трибосистемой, а также наводятся внешними источниками.

Токи, наведенные внешними источниками, непосредственно не связаны с процессами, протекающими в трибосопряжениях, и поэтому не могут нести информацию о состоянии рабочих поверхностей, поэтому они являются помехами при диагностировании. Напротив генерируемый трибосопряжением в процессе работы ток несет дополнительную информацию о физических процессах протекающих в зонах трения объекта диагностирования. Однако если в качестве диагностических признаков используется проводимость или сопротивление, характеризующее состояние зоны трения, то эти же составляющие тока также являются помехами при определении диагностических параметров, и при определенных условиях могут оказывать существенное влияние на результат диагностирования при реализации электропараметрических методов. Это требует новых подходов при разработке средств диагностирования.

Определение диагностических параметров и погрешностей неадекватности

Использование одноэлементной схемы замещения не позволяет оценить воздействие указанных источников помех на результаты диагностирования трибосопряжения. Этот недостаток в определенной мере устраняется в двухэлементной схеме замещения трибосистемы введением генератора e_0 действие, которого эквивалентно суммарному действию всех источников ЭДС и тока вызванных различными видами источников помех.

Реализация электропараметрических методов, как было отмечено ранее, предполагает использование генератора напряжения или тока в качестве источника тестового воздействия. Представляя источник тока эквивалентным ему источником напряжения, две указанные схемы источников тестового воздействия можно свести к рассмотрению одной с различными значениями параметров элементов, которые присущи их схемам замещения.

Характер взаимодействия рабочих поверхностей при работе трибосопряжения непрерывно изменяется случайным образом под воздействием ряда внутренних и внешних факторов. Это в свою очередь приводит к флуктуационному изменению его внутренней проводимости g_0 (или сопротивления r_0) и генерируемой ЭДС эквивалентного источника e_0 . Включение такого трибосопряжения в электрическую цепь совместно с источником тестового воздействия и нагрузкой, которой являются элементы средства диагностирования, вызывает изменение протекающего в измерительном контуре тока и падения напряжения на его элементах. По их изменению определяют значения диагностических признаков g_0 или r_0 , и таким образом судят о техническом состоянии трибосопряжения.

Мгновенные значения проводимости и сопротивления при использовании одноэлементной и двухэлементной схем замещения трибосопряжения со схемой его подключения к средству диагностирования, найденные через мгновенные значения измеренного напряжения определяются выражениями, представленными в табл. 1.

Выражения при аналогичных условиях и схемы подключения трибосопряжения к средству диагностирования при измерении тока приведены в табл. 2.

Таблица 1 – Определение диагностических признаков трибосопряжения при измерении напряжения

Измерение напряжения	
<i>Рисунок 1 – Одноэлементная схема</i>	<i>Рисунок 2 – Двухэлементная схема</i>
$g_{o1} = (EG - u_1 G - u_1 G_{pv}) / u_1$	$g_{o2} = (\mp EG \pm u_2 G \pm u_2 G_{pv}) / (e_o \mp u_2)$
$r_{o1} = u_1 R R_{pv} / (E R_{pv} - u_1 R - u_1 R_{pv})$	$r_{o2} = R R_{pv} (u_2 \mp e_o) / (E R_{pv} - u_2 R - u_2 R_{pv})$
Если $G_{pv} \ll G$ или $R_{pv} \gg R$	
$g_{o1} = G(E - u_1) / u_1$	$g_{o2} = G(\mp E \pm u_2) / (e_o \mp u_2)$
$r_{o1} = u_1 R / (E - u_1)$	$r_{o2} = R(u_2 \mp e_o) / (E - u_2)$
Примечание: здесь и далее верхний знак в выражениях для случая встречного включения источников E и e_o , нижний знак – для согласованного.	
Таблица 2 – Определение диагностических признаков трибосопряжения при измерении тока	
<i>Рисунок 3 – Одноэлементная схема</i>	<i>Рисунок 4 – Двухэлементная схема</i>
$g_{o1} = i_1 G G_{pa} / (E G G_{pa} - G i_1 - G_{pa} i_1)$	$g_{o2} = i_2 G G_{pa} / (E G G_{pa} \mp e_o G G_{pa} - G i_2 - G_{pa} i_2)$
$r_{o1} = (E - i_1 R - i_1 R_{pa}) / i_1$	$r_{o2} = (E \mp e_o - i_2 R - i_2 R_{pa}) / i_2$
Если $G_{pa} \gg G$ или $R_{pa} \ll R$	
$g_{o1} = i_1 G / (E G - i_1)$	$g_{o2} = i_2 G / (E G \mp e_o G - i_2)$
$r_{o1} = (E - i_1 R) / i_1$	$r_{o2} = (E \mp e_o - i_2 R) / i_2$

В табл.1 и табл.2 на рисунках и в формулах приняты следующие обозначения: PF – схема замещения трибосопряжения; XA – токосъемное устройство; MD – средство

диагностирования; $G = R^{-1} = (r_{en} + R_o)^{-1}$ – проводимость, зависящая от внутреннего сопротивления $r_{вн}$ источника энергии E и добавочного резистора R_d ; $G_{pv} = R_{pv}^{-1} = (R_u + r_{np})^{-1}$ – активная проводимость средства диагностирования R_u и соединительных проводников r_{np} при измерении мгновенного значения напряжения u_n ; $G_{pa} = R_{pa}^{-1} = (r_{np} + R_a)^{-1}$ – активная проводимость средства диагностирования R_a при измерении мгновенного значения тока i_n ; e_o – ЭДС эквивалентного источника; $r_{on} = g_o^{-1}$ – внутреннее сопротивление (проводимость) трибосопряжения, рассчитанное по результатам измерения напряжения u_n (тока i_n); n – индекс используемой схемы замещения трибосопряжения, $n = 1$ – одноэлементная схема, $n = 2$ – двухэлементная.

Рассмотрение выражений представленных в табл.1 и табл.2 показывает, что при определенных условиях на измерение диагностических параметров может оказывать значительное влияние ЭДС источника e_o .

В ряде случаев при диагностировании, например, измеряемое напряжение может оказаться близким к нулю. Если в этом случае для интерпретации результатов диагностирования используется одноэлементная схема замещения трибосопряжения (рисунок 1), то можно сделать вывод о работе трибосопряжения в режиме близком или практически сухого трения, который характеризуется малым внутренним сопротивлением зоны трения r_o (или большой проводимостью g_o). Использование для анализа результатов измеренного напряжения двухэлементной схемы замещения трибосопряжения (рисунок 2) позволяет заметить, что полученный результат может быть обусловлен не только малым сопротивлением зоны трения r_o (или большой проводимостью g_o), но и влиянием ЭДС источника e_o . Поэтому фактическое значение сопротивления r_o может оказаться существенно больше (проводимость g_o существенно меньше), чем значение, которое получено при использовании одноэлементной схемы замещения для интерпретации результатов диагностирования. В связи с этим фактически трибосопряжение может функционировать в режиме жидкостной или полужидкостной смазки. Однако определить это невозможно при использовании рассмотренного подхода, так как неизвестно значение ЭДС генератора e_o .

Подобные замечания можно сделать и при измерении тока при диагностировании.

Таким образом, неадекватность используемой схемы замещения оказывает непосредственное влияние на интерпретацию результатов диагностирования трибосопряжения и приводит к погрешностям, которые при измерении напряжения или тока получены с учетом выражений представленных в табл.1, табл.2 и сведены в табл.3.

Таблица 3 – Погрешности неадекватности

Измерение напряжения	
Соответствующие формулы	Выражение
$\delta_{ug} = (g_{o1} - g_{o2})/g_{o2}$; $\delta_{ur} = (r_{o2} - r_{o1})/r_{o1}$	$\delta_{ug} = \delta_{ur} = \mp e_o/u$
Если $G_{pv} \ll G$ или $R_{pv} \gg R$	
$\delta_{ug} = (g_{o1} - g_{o2})/g_{o2}$; $\delta_{ur} = (r_{o2} - r_{o1})/r_{o1}$	$\delta_{ug} = \delta_{ur} = \mp e_o/u$
Измерение тока	
Соответствующие формулы	Выражение
$\delta_{ig} = (g_{o1} - g_{o2})/g_{o2}$; $\delta_{ir} = (r_{o2} - r_{o1})/r_{o1}$	$\delta_{ig} = e_o/\mp u$, $u = u_g = E \pm (G + G_{pa})i/GG_{pa}$; $\delta_{ir} = e_o/\mp u$, $u = u_r = E \pm (R + R_{pa})i$
Если $G_{pa} \gg G$ или $R_{pa} \ll R$	
$\delta_{ig} = (g_{o1} - g_{o2})/g_{o2}$; $\delta_{ir} = (r_{o2} - r_{o1})/r_{o1}$	$\delta_{ig} = e_o/\mp u$, $u = u_g = E \pm i/G$; $\delta_{ir} = e_o/\mp u$, $u = u_r = E \pm iR$

В табл.3 приняты следующие обозначения: δ_{ug} , δ_{ur} , δ_{ig} , δ_{ir} – погрешность неадекватности определения проводимости и сопротивления трибосопряжения соответственно при измерении напряжения или тока.

Определение приведенных погрешностей базируется на положении более адекватного представлении трибосопряжения двухэлементной схемой замещения по сравнению с одноэлементной схемой. Так же полагается, что измеренные при диагностировании ток или напряжение, связанные с проводимостью и сопротивлением зоны трения зависимостями, представленными в табл.1 и табл.2, приравниваются для одно- и двухэлементной схемы замещения, что и позволяет получить погрешности вызванные неадекватностью схемы замещения трибосопряжения.

Мгновенные значения проводимости и сопротивления являются взаимнообратными физическими величинами, поэтому в табл.3 для каждого случая определения погрешности приведены соответствующие формулы и выражения погрешности. Из приведенных соотношений следует равенство погрешностей определенных по соответствующим формулам и при измерении напряжения и в случае, когда при диагностировании измеряются мгновенные значения тока.

Составляющие ЭДС и тока, генерируемые трибосопряжением в различных условиях эксплуатации и режимах смазки рабочих поверхностей, могут изменяться в широких пределах, что подтверждается их оценкой экспериментальными исследованиями [1]. При этом в промышленных условиях диагностирования наведенные помехи могут существенно превышать генерируемые трибосопряжением. В связи с чем, для оценки погрешности неадекватности были выбраны условия, в которых мгновенное значение ЭДС эквивалентного источника изменяется в диапазоне от 10 мкВ до 1В. Такой диапазон соответствует диагностированию, проводимому в лабораторных и условиях эксплуатации.

Характерный вид погрешности неадекватности при измерении напряжения в случае встречного включения тестового источника энергии и ЭДС эквивалентного источника представлен на рисунке 5. Аналогичный вид зависимости имеют и при согласованном включении источников, а также и при измерении тока.

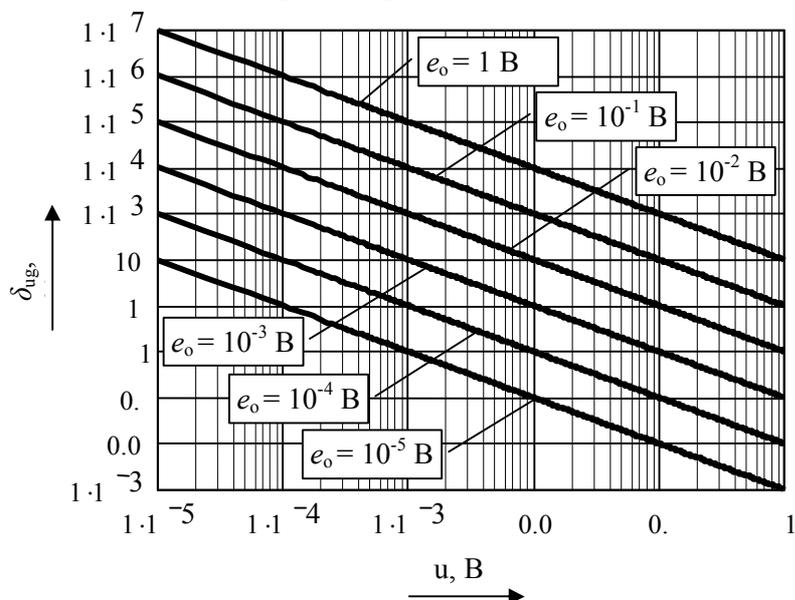


Рисунок 5 – Погрешности неадекватности схемы замещения трибосопряжения

Представленные зависимости иллюстрируют существенное влияние ЭДС эквивалентного источника в конечном итоге на интерпретацию результатов диагностирования. Кроме того, они указывают на пределы, которыми ограничено использование одноэлементной схемы замещения при анализе результатов исследования

трибосопряжения. Причем при незначительном измеренном сигнале и существенной помехе погрешность столь велика, что диагностирование в подобных условиях невозможно. Улучшение отношения сигнала и помехи может быть достигнуто соответствующим выбором параметров средства диагностирования, однако для этого требуется априорная информация о параметрах схемы замещения эквивалентного источника e_0 , которая часто отсутствует.

Выводы

1 Использование одноэлементной схемы замещения трибосопряжения ограничено погрешностью неадекватности определения диагностических признаков.

2 Оценка погрешности неадекватности и область применения одноэлементной схемы замещения трибосопряжения может быть выполнена только при наличии априорной информации о величине ЭДС эквивалентного источника.

3 Неоднозначность результатов диагностирования при использовании двухэлементной схемы замещения трибосопряжения указывает на необходимость поиска иных решений при использовании электропараметрических методов.

ЛИТЕРАТУРА

1 Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст] / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение - 1, 2001. – 376 с.

Михаил Георгиевич Захаров

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доцент кафедры «Приборостроение, метрология и стандартизация»

Тел.(4862)41-98-76

E-mail: pms35@ostu.ru

УДК 681.122.2

ЛУНИН М. В., БОБРОВ А.В.

АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВОГО РАСХОДОМЕРА

Статья включает постановку задачи, построение гидронеуматической схемы измерительной цепи и временные диаграммы работы пузырькового расходомера

The article contents staging problems, building hydropneumatic scheme, measuring circuit and timing diagrams of working of bubble flowmeter.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При необходимости контроля расхода малых объемов наиболее точными являются пузырьковые расходомеры. Известен дискретный метод измерения малых объемов газа [1], при реализации которого осуществляется барботаж измеряемого газа через слой жидкости с одновременным подсчетом числа пузырьков газа. В подобных дискретных устройствах отсутствует учет параметров вязкой среды, используемой для барботажа при проведении измерения. Принято считать, что отсутствует теплообмен между жидкостью и газом, т.е. вязкость и поверхностное натяжение жидкости не изменяются, а объем пузырька остается постоянным и определяется, в первую очередь, величиной диаметра сопла. Это накладывает ограничения при проведении измерения, связанные с необходимостью термостатирования и измерения параметров вязкой среды, что снижает возможности метода и средства измерения.

Таким образом, для контроля объема одного пузырька газа проектируемое устройство должно обеспечивать контроль параметров контрастирующей жидкости. Среди таких параметров: вязкость, коэффициент поверхностного натяжения, температура.

При проектировании устройства следует сделать ряд допущений:

1. Форма пузырьков – сферическая.
2. Пузырьки с газом движутся вертикально и равномерно.
3. Область расхода газа Q не превышает некоторого Q_{KP} ($Q < Q_{KP}$) (система находится в таком режиме, при котором каждый пузырек газа образуется в отдельности, отрывается и поднимается независимо от других, не образуя струю).
4. Жидкость, используемая для контрастирования, имеет плотность много большую плотности газа. Отсутствует диффузия между жидкостью и газом.

ПОСТРОЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ

Для определения вязкости существуют два основных метода: метод Пуазейля и метод Стокса. В данном случае вязкость необходимо контролировать по перемещению шарика газа в вязкой среде. Поэтому целесообразно использовать метод Стокса, измененный по результатам математического моделирования, которое обычно проводится при получении формулы Пуазейля. [2]

Наиболее целесообразным при измерении малых объемов газа является преобразование непрерывной неэлектрической величины – расхода газа в дискретную величину. При этом вязкость и поверхностное натяжение среды определяются по скорости прохождения пузырька с газом. Тогда гидроневматическая схема организации измерения имеет вид, представленный на рисунке 1. Газ через сопло 4 поступает в цилиндрическую кювету 1, заполненную вязкой жидкостью. На выходе сопла 4 образуется пузырек газа, который перемещается вдоль оси цилиндрической кюветы. Контроль скорости прохождения пузырька в вязкой среде осуществляется с помощью оптических преобразователей, измеряя время смещения следования импульсов, поступающих от фотоприемников 5. При движении пузырьки газа уменьшают слой жидкости, которая является непрозрачной средой между источником света 2 и фотоприемником 5. Изменение слоя приводит к образованию импульсов, поступающих на компараторы напряжения 6 и 7.

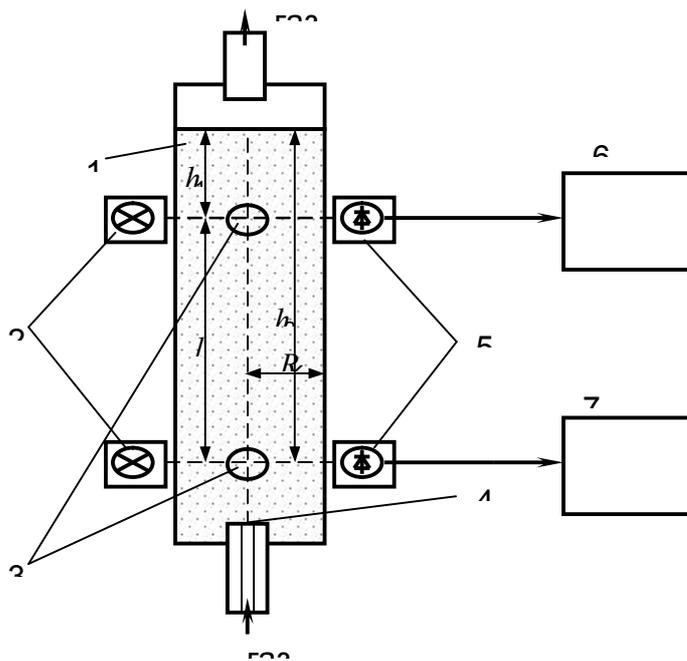


Рисунок 1 - Гидроневматическая схема измерения

Измерительная цепь расходомера, реализующая измерение времени смещения следования импульсов, приведена на рисунке 2, а временные диаграммы работы устройства - на рисунке 3.

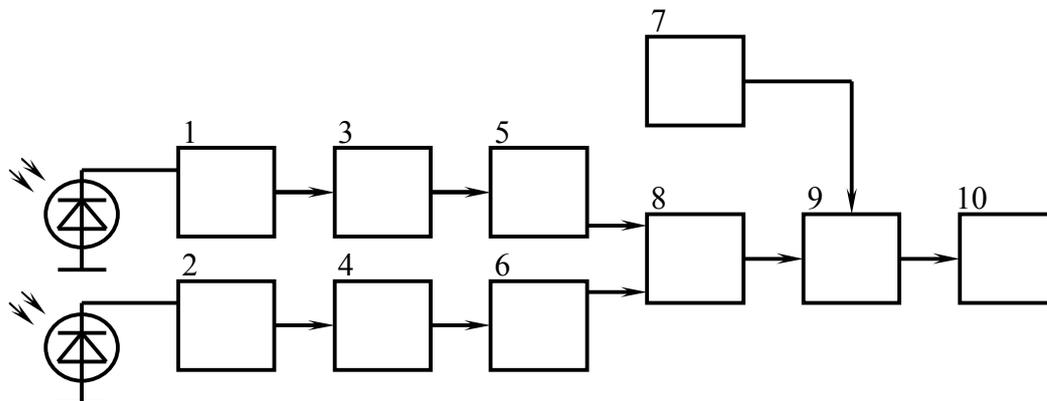


Рисунок 2 - Схема проведения измерения

1, 2 – компараторы напряжения; 3, 4 – дифференциальная цепь; 5, 6 – однополупериодный выпрямитель; 7 – генератор импульсов; 8 – логическая цепь; 9 – ключ; 10 – суммирующий счетчик

В соответствии с рисунком 2, сигналы от фотопреобразователей поступают на компараторы напряжения 1 и 2. При срабатывании компараторов на выходе формируются импульсы ТТЛ логики. Далее импульсы поступают на дифференциальные цепи 3, 4 и однополупериодные выпрямители 5, 6. Сформированные короткие импульсы поступают на логическую цепь 8, выполненную на триггере, на выходе которого формируется импульс, длительность которого равна времени смещения импульсов от выпрямителей 5 и 6. Импульс определённой длительности управляет ключом 9, после которого формируется последовательность импульсов частотой F , поступающих от генератора 7.

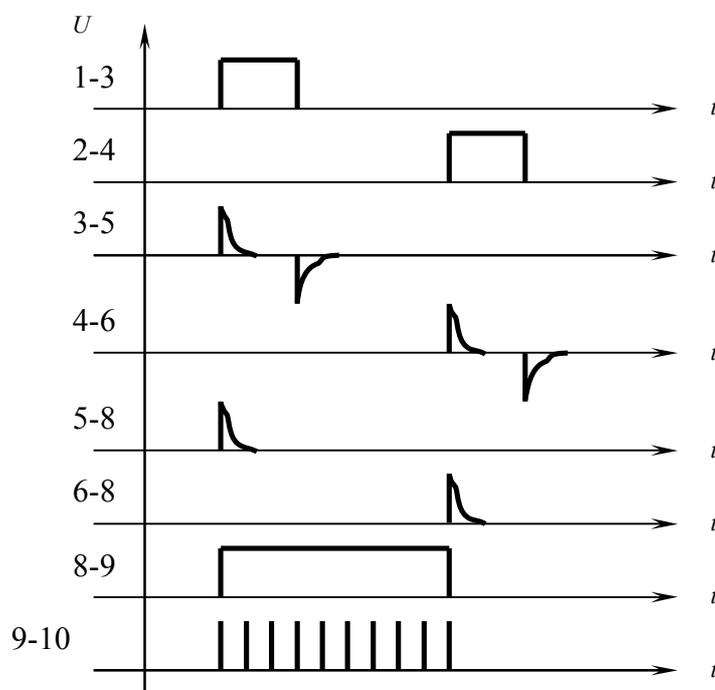


Рисунок 3 - Временные диаграммы работы устройства

Последовательность импульсов поступает на счетчик 10, при этом искомое время прохождения пузырька с газом определяют по формуле:

$$t = \frac{N}{F}, \quad (1)$$

где: N - число импульсов.

Вязкость жидкости определяют по формуле:

$$\eta = \frac{(p_1 - p_2) \cdot R_K^2 \cdot t}{4 \cdot l^2}, \quad (2)$$

где: $p_1 = \rho_{ж} \cdot g \cdot h_1$ - давление на глубине h_1 ;

$p_2 = \rho_{ж} \cdot g \cdot h_2$ - давление на глубине h_2 ;

$\rho_{ж}$ - плотность контрастирующей жидкости;

R_K - радиус кюветы;

t - время прохождения пути $l = h_2 - h_1$.

По градировочным характеристикам для данной жидкости определяют температуру вязкой жидкости в измерительной кювете - Θ .

Затем определяют коэффициент поверхностного натяжения по регрессионным зависимостям вязкости от поверхностного натяжения, предварительно полученным для данной жидкости.

Далее определяется объем газа в пузырьке:

$$V_{CO_2} = \frac{\pi \cdot R}{g \cdot \rho_{CO_2}} (g \cdot \rho_{ж} \cdot D \cdot R + 2 \cdot \sigma), \quad (4)$$

где: R - радиус отверстия сопла;

ρ_{CO_2} - плотность газа (определяют по градировочным характеристикам, для данной жидкости, в соответствии с температурой Θ);

D - глубина, на которой залегает вершина сопла от поверхности.

Расход газа определяется суммой объемов всех пузырьков газа образующихся в барботажной системе.

ВЫВОД

Предложенные аспекты проектирования пузырькового расходомера позволяют построить устройство, учитывающее изменение параметров вязкой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарев, Г.С. Дискретный метод измерения малых объемов газа [Текст] / Г.С. Бондарев, В.С. Мальшев // Измерительная техника. - 1970. - № 5. - С. 102-103.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики [Текст] / И.В. Савельев. - Т. 1. – М. - 1970. – 512 с.

Адрес редакции:

Орловский государственный технический университет
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 43-48-90, 40-96-14
www.ostu.ru
E-mail: nmu@ostu.ru

Технический редактор А.В. Морозова
Корректор А.В. Морозова
Компьютерная верстка А.В. Морозова

Сдано в набор 15.12.2008 г.
Подписано в печать 18.12.2008 г.
Формат 60x88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,5
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.