

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ
МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ
СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
«МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И
РЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ»

06–09 апреля 2010 года

Выпуск 26

В 2 томах

Том 2

Минск
БНТУ
2012

THE MINISTRY OF EDUCATION OF THE
REPUBLIC OF BELARUS

BELARUSIAN
NATIONAL
TECHNICAL
UNIVERSITY

MASHINOSTROENIE

THE REPUBLICAN
INTERDEPARTMENTAL
COLLECTION THE SCIENTIFIC OF
WORKS PROCEEDINGS

ON MATERIALS OF THE
INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND
TECHNICAL CONFERENCE
«MATERIALS, THE EQUIPMENT AND
RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES
IN MECHANICAL ENGINEERING»

06–09 April, 2010

Release 26

In 2 volumes

Volume 2

Minsk
BNTU
2012

621.7
УДК 621.002(082)
ББК 34.4—
М 38

Сборник основан в 1976 году

Редакционная коллегия:

Б. М. Хрусталеv (председатель), Ф. И. Пантелеенко (зам. председателя),
Ф. А. Романюк (зам. председателя), П. П. Анципович,
И. М. Бабук, И. Л. Баршай, А. И. Бачанцев (отв. секретарь), Г. Я. Беляев,
Ю. В. Василевич, В. А. Данилов, О. Г. Девойно,
Э. М. Дечко, С. А. Иващенко, М. М. Кане, В. М. Колешко,
А. И. Кочергин, М. И. Михайлов, Ж. А. Мрочек, М. Ф. Пашкевич,
В. И. Похабов, А. Ф. Присевок, В. А. Сидоренко, А. Т. Скойбеда,
Н. В. Спиридонов, В. И. Туромша, И. П. Филонов, И. С. Фролов,
А. В. Чигарев, В. И. Шагун, В. К. Шелег, А. М. Якимович

Под ред. Б. М. Хрусталева

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Н. Н. Попок,
доктор технических наук, профессор В. С. Ивашко

В сборнике представлены результаты исследований различных процессов механической обработки деталей и технологии их изготовления. Изложены новые принципы проектирования некоторых инструментов, станков и другого технологического оборудования. Приведены результаты работ по электрофизическим и электрохимическим способам обработки материалов. Представлены некоторые направления развития механики структур и материалов. Рассмотрены проблемы динамики и прочности машин. Изложены актуальные вопросы экономики машиностроительного производства, инженерной педагогики и психологии.

ISBN 978-985-525-860-6 (Т.2)
ISBN 978-985-525-861-3

© Белорусский национальный
технический университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ, МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН	6
<i>Авсиевич А.М., Реут Л.Е., Дубовская Е.М.</i> АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ИЗНОСА В ВЫСШИХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАХ.....	6
<i>Анципорович П.П., Авсиевич А.М., Дворянчикова А.Б., Николаев В.А.</i> ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ИЗЛОЖЕНИЯ РАЗДЕЛА «КИНЕМАТИКА ЗУБЧАТЫХ МЕХАНИЗМОВ» В КУРСЕ «ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН».....	9
<i>Анципорович П.П., Акулич В.К.</i> УЧЕТ ТРЕНИЯ ПРИ СИЛОВОМ РАСЧЕТЕ МЕХАНИЗМОВ И СОСТАВЛЕНИИ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ.....	14
<i>Анципорович П.П., Дворянчикова А.Б., Галаев К.О.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА ПО ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН.....	18
<i>Анципорович П.П., Кудин В.В.</i> УРАВНОВЕШИВАНИЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЗВЕНЬЕВ В ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН.....	22
<i>Астахов Э.И., Гарах В.А., Шкурко С.С.</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ПРИВОДОВ МЕХАНИЗМОВ НОЖНИЧНЫХ ПОДЪЕМНИКОВ.....	26
<i>Бачанцев А.И., Гриневич Е.А.</i> ОСОБЕННОСТИ ПРЕПОДАВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН СТУДЕНТАМ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ.....	30
<i>Сухоцкий А.А., Дворянчикова А.Б.</i> ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВЕРХНЕГО РАБОЧЕГО ДИСКА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОБРАБОТКИ.....	33
<i>Шахрай Л.И.</i> ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОСТИ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ.....	37
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ; ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	43
<i>Беляева Г.И., Беляев Г.Я., Кочергин А.И.</i> ВЛИЯНИЕ ХИМСОСТАВА И СТРУКТУРЫ НА ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ СТАЛЕЙ РЕЗАНИЕМ.....	43
<i>Гордиенко А.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАК ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАДАЧИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ.....	47
<i>Данилов В.А.</i> АРМИРОВАНИЕ МНОГОГРАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА БАЗЕ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ КРИВЫХ.....	50
<i>Дечко Э.М., Воронович А.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ КОНТАКТА ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН И КОРПУСОВ ФРЕЗ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	56
<i>Ивашин Э.Я., Ивашин В.Э.</i> МЕТОД ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИН.....	63
<i>Кочергин А.И., Ажар А.В., Ратько Е.Ф.</i> АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ И ХАРАКТЕРА ПОВРЕЖДЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ В КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЯХ.....	64
<i>Кочергин А.И., Ажар А.В., Ратько Е.Ф., Бачанцев А.И.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ЗАМЕНЫ КОМБИНИРОВАННЫХ ОСЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....	70
<i>Луговой И.В.</i> ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ.....	74
<i>Спиридонов Н.В., Кобяков О.С., Адаменко Д.В.</i> К ВОПРОСУ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ.....	76
<i>Тумилович М.В.¹, Пилиневич Л.П.², Шеко Г.А.², Тарайкович А.М.²</i> ПОРИСТЫЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ОЧИСТКИ И ОСУШКИ ГАЗОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ.....	78
<i>Туромшиа В.И., Довнар С.С., Туми Эль-Мабрук Абужафер Али</i> ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ ОПОР СТОЛА ПРОДОЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	81
<i>Фельдштейн Е.Э.</i> СВЕРЛЕНИЕ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В МОЛИБДЕНЕ СВЕРЛАМИ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ.....	87

<i>Фельдштейн Е.Э., Х. Паха-Голенбиовска</i> ВЛИЯНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА НА ГЕОМЕТРИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ АНТИФРИКЦИОННОГО ЧУГУНА.....	91
<i>Фролов И.С., Иващенко С.А., Мрочек Ж.А.</i> КОНСТРУИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ОСОБЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	95
<i>Чарторыйский А.В., Шагун В.И., Руцкий Я.С., Алтунин С.В., Душутин А.В.</i> ВНЕДРЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ РУПП «БЕЛАЗ».....	100
МЕХАНИКА СТРУКТУР И МАТЕРИАЛОВ.....	104
<i>Александров А.А., Пронкевич С.А., Куриленко В.В.</i> РАСЧЁТ НДС РАМЫ БОЛЬШЕГРУЗНОГО САМОСВАЛА С ПОМОЩЬЮ ИНЖЕНЕРНОГО ПАКЕТА ANSYS.....	104
<i>Василевич Ю.В., Неумержицкая Е.Ю., Галуза И.М.</i> МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕРМОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЫ, ОСЛАБЛЕННОЙ ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ ОТВЕРСТИЕМ.....	106
<i>Василевич Ю.В., Остриков О.М.</i> ТЕОРИЯ НЕГОМОГЕННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АМОРФНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.....	111
<i>Дикан Ж.Г., Ларченков Л.В.</i> МЕХАНИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРУКТУР.....	116
<i>Зубко С.А.</i> РОСТ ТРЕЩИНЫ В ВЕРШИНЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА НА РАЗРЫВ.....	121
<i>Клус С.А., Ширвель П.И., Глембоцкий А.В.</i> ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕХЛА ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ АТОМНОГО РЕАКТОРА.....	124
<i>Куриленко В.В., Пронкевич С.А., Александров А.А.</i> АНАЛИЗ НДС ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА.....	131
<i>Неумержицкая Е.Ю.</i> МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ С ПЕРЕХОДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.....	134
<i>Пронкевич С.А., Карташев Е.Л., Старовойтова О.Л.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО ПАКЕТА LS-DYNA ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРА.....	138
<i>Пронкевич С.А., Трухнов А.Л.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО ПАКЕТА LS-DYNA ДЛЯ АНАЛИЗА ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ.....	142
<i>Сокоров И.О., Стиридонов Н.В., Володько А.С., Пилецкая Л.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ВАЛОВ, УПРОЧНЕННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ.....	146
<i>Скляр О.Н.¹, Босяков С.М.², Доста А.Н.³, Казакевич В.А.¹</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В КОРНЯХ ОПОРНЫХ ЗУБОВ МОСТОВИДНОГО ПРОТЕЗА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКИ.....	150
<i>Чигарев А.В., Ковеня Т.А., Покульницкий А.Р., Солошенко Д.С.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ.....	156
<i>Чигарев А.В., Ручан М.В., Шукевич Т.В.</i> РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ.....	160
<i>Ширвель П.И., Клус С.А., Левчук А.В.</i> ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ.....	164
<i>Язневич А.М.</i> ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИИ НА ПРОЧНОСТЬ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ.....	172
<i>Якубовский А.Ч., Якубовский Ч.А., Галуза И.М., Галуза Е.М.</i> АРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НАВИВАЕМОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	177
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ И СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ; НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОСИСТЕМЫ.....	180
<i>Баркалин В.В., Ивкина О.М.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОЖИДКОСТНОГО ЭЛЕМЕНТА БИОСЕНСОРА В ПАКЕТЕ ANSYS CFX.....	180
<i>Баркалин В.В., Плетежов А.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ИК-СПЕКТРОВ МАССИВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ПАКЕТЕ NAMD.....	184
<i>Загирняк М.В., Драгобецкий В.В., Пирогов Д.Л., Коноваленко А.Д., Маркевич А.Б.</i> МОДУЛЬНАЯ ВЗРЫВООУДАРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ, НАНОПОКРЫТИЙ И НАНОЛЕГИРОВАНИЯ.....	188

<i>Клус С.А., Покульницкий А.Р., Ширвель П.И.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОПЛИВА И ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА С ПОМОЩЬЮ МКЭ В СРЕДЕ ANSYS	193
<i>Колешко В.М.¹, Воробей Е.А.¹, Хмурович Н.А.²</i> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МОБИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОГНИТИВНЫМ СОЗНАНИЕМ ЧЕЛОВЕКА	199
<i>Колешко В.М., Гаджинский Т.Т., Чащинский А.С.</i> МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ.....	209
<i>Колешко В.М., Гулай А.В., Воробей Е.А., Гаджинский Т.Т., Кукенов А.С., Мардас Д.В., Чащинский А.С.</i> ПРОГРАММА WIS РАСПОЗНАВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБРАЗОВ	212
<i>Колешко В. М. , Гулай А. В. , Гулай В. А.</i> САМООРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАБОТКЕ: АКУСТИЧЕСКИЙ СЕНСОРНЫЙ КОНТРОЛЬ	217
<i>Колешко В. М., Гулай А. В., Лысковский В. В., Гулай В. А., Крупская Е. В., Левченко Н. В.</i> СЕНСОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ОКСИДОВ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ	222
<i>Колешко В. М., Гулай А. В., Польшкова Е. В., Гулай В. А.</i> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ	227
<i>Колешко В.М., Рыженков О.Е.</i> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ	229
<i>Колешко Л.А., <u>Сунка В.Я.</u></i> ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ МИКРО-НАНОАКТЮАТОРЫ	233
<i>Колешко В.М., <u>Сунка В.Я.</u>, Воробей Е.А., Мардас Д.В., Сунка А.А., Романович Д.В., Храменков Е.В</i> МИКРОРЕЖИМНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	239
<i>Колешко В.М., <u>Сунка В.Я.</u>, Кутковский В.Д.</i> ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	244
<i>Колешко В.М., <u>Сунка В.Я.</u>, Шиманович А.В., Левый Ю.В., Грибовский В.О.</i> ЭКСПРЕСС АНАЛИЗАТОР МОТОРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ	248
<i>Курский В.В., <u>Сунка В.Я.</u>, Польшкова Е.В.</i> ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ПЛИС	255
<i>Подлозный Э. Д., Гречихин Л. И.</i> НАНОТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА УПРОЧНЕННОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ КРЕМНЕЗЕМА И ГЛИНОЗЕМА, АРМИРОВАННЫХ КЛАСТЕРАМИ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ	259
<i>Романюк Г.Э., Мардас Д.В., Журавский А.О.</i> ПРОГРАММА ПОДСЧЕТА ЧАСТОТЫ ВХОЖДЕНИЯ СЛОВ В ТЕКСТЕ НА БЕЛОРУССКОМ И ПОЛЬСКОМ ЯЗЫКАХ	264
<i>Соколова К.Г., <u>Сунка В.Я.</u>, Трафимова Е.В.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ТЕНЗОРА ПРОВОДИМОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	268
<i><u>Сунка В.Я.</u>, Воробьев С.А., Захаренко Е.Н., Польшкова Е.В.</i> БЕСПРОВОДНАЯ СЕТЬ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ – WIMAX	275
РЕФЕРАТЫ	280

ТЕОРИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ, МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН

УДК 621.83

Авсиевич А.М., Реут Л.Е., Дубовская Е.М.

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ИЗНОСА В ВЫСШИХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАХ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Известно, что интенсивность изнашивания в парах трения зависит от величины контактного давления и относительной скорости скольжения сопряженных поверхностей. При этом наиболее существенное влияние на нее оказывает изменение давления, тогда как с изменением относительной скорости скольжения интенсивность изнашивания изменяется незначительно /1/. Контактное давление характеризует напряженное состояние локального участка поверхности трения. Относительная скорость определяет время существования единичной фрикционной связи между микровыступами сопряженных поверхностей. Оба этих параметра для каждой точки изнашиваемых поверхностей являются переменными величинами.

В литературе основные закономерности трения исследованы для поступательной и вращательной кинематических пар. Соответствующие узлы трения являются основой установок для экспериментального исследования процессов трения и изнашивания. В этих парах относительная скорость скольжения является постоянной, путь трения одинаков для всех точек обеих поверхностей трения поступательной пары и всех точек поверхности подвижного звена вращательной пары. Однако более глубокий анализ взаимных перемещений в парах трения показывает, что различные участки поверхностей характеризуются разной длительностью нахождения под воздействием факторов износа. Причем это определяется не микрогеометрией, а формой контактирующих профилей, закономерностями их относительных перемещений и нагруженностью внешними усилиями. Для высших кинематических пар показателем, определяющим длительность воздействия факторов износа на данном элементе поверхности трения, является коэффициент удельного скольжения λ .

В литературе /2/ λ рассматривается как геометрический аналог диссипации энергии, учитывающий путь скольжения сопряженных профилей. Известно также, что контактное напряжение в разных точках профилей пропорционально приведенному радиусу кривизны профилей в точке контакта ρ_{Π} , т. е. приведенный радиус кривизны профилей соответствует геометрическому аналогу контактного давления /3/. Исходя из этого, известную формулу для расчета интенсивности изнашивания /1/

$$I = k \cdot p^m \cdot V^n \quad (1)$$

можно записать в виде

$$I = k \cdot \lambda \cdot \rho_{\Pi}^m \cdot V^n,$$

где k , m , и n – определяемые эмпирическим путем коэффициенты, зависящие от материалов поверхностей трения и условий смазки;

p – контактное давление;

V – относительная скорость скольжения в точке контакта взаимодействующих профилей.

Здесь коэффициент удельного скольжения λ характеризует удельный путь трения для некоторого элементарного участка поверхности элемента высшей пары. В соответствии с ос-

новой теоремой зубчатого зацепления [3], получены выражения для определения λ_1 и λ_2 в контактной точке профиля зубьев

$$\lambda_1 = 1 - \frac{\rho_2 \cdot \omega_2}{\rho_1 \cdot \omega_1} = 1 - \frac{\rho_2 \cdot z_1}{\rho_1 \cdot z_2}, \quad \lambda_2 = 1 - \frac{\rho_1 \cdot \omega_1}{\rho_2 \cdot \omega_2} = 1 - \frac{\rho_1 \cdot z_2}{\rho_2 \cdot z_1},$$

где ρ_1, ρ_2 – радиусы кривизны поверхностей в точке контакта;

ω_1, ω_2 – угловые скорости вращения зубчатых колес;

z_1, z_2 – числа зубьев зубчатых колес.

Всякая высшая пара, образованная криволинейными поверхностями, подчиняется условию основной теоремы зубчатого зацепления, но передаточное отношение и радиусы начальных окружностей r_W в такой паре являются переменными. Поэтому в общем случае для некоторого i -го элементарного участка поверхности элемента высшей пары можно записать

$$\lambda_{1i} = 1 - \frac{\rho_{2i} \cdot r_{W1i}}{\rho_{1i} \cdot r_{W2i}}, \quad \lambda_{2i} = 1 - \frac{\rho_{1i} \cdot r_{W2i}}{\rho_{2i} \cdot r_{W1i}}. \quad (2)$$

Быстроходность пары трения при одинаковой геометрии контактирующих профилей вероятно оказывает существенное влияние на интенсивность изнашивания. Для i -го участка поверхности элемента высшей пары скорость относительного скольжения зависит от скорости вращения начального звена ω_1 и непосредственно определяется как разность тангенциальных составляющих скоростей в точке контакта [3]. Для элементов поверхностей каждого из звеньев высшей пары

$$V_{S1} = V_{T1} - V_{T2}; \quad V_{S2} = V_{T2} - V_{T1}.$$

Выражая скорости скольжения через ω_1 , получим

$$V_{S1} = V_{T1} - V_{T2} = \omega_1 \rho_1 - \omega_2 \rho_2 = \omega_1 (\rho_1 - u_{21} \rho_2). \quad (3)$$

Тогда в конечном итоге формула (1) для расчета интенсивности изнашивания в i -й точке поверхности элемента ведущего звена высшей кинематической пары примет вид

$$I_{i1} = k \cdot \left(1 - \frac{r_{W1i} \rho_{2i}}{r_{W2i} \rho_{1i}} \right) \cdot \rho_{\Pi i}^m \cdot [\omega_{1i} (\rho_{1i} - u_{21i} \rho_{2i})]^n, \quad (4)$$

а для ведомого звена

$$I_{i2} = k \cdot \left(1 - \frac{r_{W2i} \rho_{1i}}{r_{W1i} \rho_{2i}} \right) \cdot \rho_{\Pi i}^m \cdot [\omega_{1i} (u_{21i} \rho_{2i} - \rho_{1i})]^n. \quad (5)$$

Данные формулы справедливы не только для эвольвентного зацепления, но и для любых высших пар с криволинейными профилями контактирующих поверхностей, которые подчиняются условию основной теоремы зацепления, но отличаются тем, что начальные радиусы, передаточное отношение и, возможно, скорость вращения начального звена являются переменными. Используя аналогичный подход, можно получить зависимость интенсивности изнашивания от геометрических и кинематических параметров для элементов высшей пары с плоским профилем одного из звеньев.

Полученные зависимости интенсивности изнашивания позволяют определить, насколько быстро изнашивается данный элемент поверхности относительно прочих, прогнозировать изменения геометрии профилей и кинематических характеристик звеньев высшей пары. Если для наиболее быстроизнашивающегося элемента с интенсивностью изнашивания I_{\max} известен износ U_{\max} за один или за некоторое конечное число циклов нагружения, то для каждого i -го элемента за тот же период износ составит

$$U_i = U_{\max} \frac{I_i}{I_{\max}}.$$

Профиль элемента высшей пары может быть описан в полярных координатах r_i и θ_i или декартовых координатах, причем начало координат должно совпадать с центром вращения звена. Номинальные координаты для массива точек неизношенных профилей r_{i0} и θ_{i0} и точка начала их контакта являются известными. Это позволяет определить все геометрические параметры высшей пары, входящие в формулы (4) и (5), построить линию зацепления, в том числе для высших пар с переменным передаточным отношением. Расчеты целесообразно провести для множества значений обобщенной координаты φ_1 (угла поворота начального звена) с некоторым шагом $\Delta\varphi_1$. Износ i -го элемента поверхности U_i за один цикл нагружения происходит в направлении нормали, что приводит к уменьшению радиуса кривизны ρ_i . Зная эти величины можно определить новый массив значений координат уже для изношенного профиля. В большинстве случаев, когда угол между радиус-вектором r_i и касательной к профилю в данной точке не превышает 25° с достаточной для практики точностью можно принять, что в результате износа изменяется полярный угол θ_i при неизменном радиусе r_i . Полярные координаты изношенного профиля станут: r_i и $(\theta_i - \Delta\theta_i)$, где

$$\Delta\theta_i = \frac{U_i}{r_i}.$$

Математически описав форму профилей обоих звеньев, приобретенную ими в результате изнашивания, используя различные методы расчета [4], можно построить для них уточненную линию зацепления, определить новые значения начальных радиусов и передаточных отношений в зависимости от обобщенной координаты φ_1 . После следующего цикла изнашивания все указанные расчеты повторяются в описанной последовательности. Таким образом, можно промоделировать изменение в процессе изнашивания формы профилей звеньев, составляющих высшую пару, до наступления предельного износа и потери работоспособности. Соответственно определимо и изменение кинематических характеристик работы передачи, основу которой составляет данная высшая кинематическая пара.

Описанный алгоритм позволяет исследовать влияние колебаний угловой скорости начального звена на процесс изнашивания, обусловленных функционированием пары трения в машинном агрегате.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трение, износ и смазка: (Трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе – М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
2. Милевская Т.В. Возможные имитационные модели износа силовой открытой зубчатой передачи с большим передаточным отношением / Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. – № 8, 2008.
3. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. - 4-е изд. – М.: Наука, 1988. - 640 с.
4. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука, 1968. – 584 с.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ИЗЛОЖЕНИЯ РАЗДЕЛА «КИНЕМАТИКА ЗУБЧАТЫХ МЕХАНИЗМОВ» В КУРСЕ «ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН»

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Зубчатые механизмы находят в технике широкое применение. Их используют как в качестве передаточных (для передачи движения от двигателя к основному исполнительному механизму), так и в качестве основных исполнительных механизмов. Это привело к многообразию как схем преобразующих движение механизмов, так и их конструктивному оформлению. Одни и те же кинематические схемы, примененные в различных отраслях техники (металлообрабатывающие станки, штамповочное оборудование, механизмы приборов и т.д.) могут конструктивно выглядеть совершенно по-разному. Поэтому актуальной является потребность научить студентов составлению кинематических схем, дать представление об их конструкции. С другой стороны необходимо уметь для исследуемой конструкции составлять кинематическую схему с учетом современных стандартов и решать задачи кинематики. Проектированию схем и конструированию механизмов обучают последовательно в курсе теории механизмов и машин и в курсе деталей машин. Таким образом, курс теории механизмов и машин является первым курсом в общепрофессиональной подготовке, в котором проявляются противоречия, связанные с более поздним ознакомлением с конструктивными элементами узлов механизмов и машин. Для облегчения понимания излагаемого в разделе «Кинематика зубчатых механизмов» материала требуется продуманное использование имеющихся на кафедре методических средств (стенды, плакаты, коллекция моделей механизмов, учебная литература).

В курсе теории механизмов и машин вышеназванному разделу отводится 4 часа лекций, 4 часа практических занятий и 2 часа лабораторных работ. Рассмотрим возможности применения методических материалов для эффективного усвоения учебного материала, учитывая, что в соответствии с типовой программой курса необходимо изучить классификацию зубчатых механизмов, кинематический анализ зубчатых механизмов с неподвижными осями вращения, кинематический анализ зубчатых механизмов с подвижными осями вращения (дифференциальных, планетарных, замкнутых дифференциальных).

Совершенно очевидно, что при чтении лекций в больших поточных аудиториях (70 – 120 студентов) демонстрация плакатов, моделей, компьютерных презентаций неэффективна. Точно также неэффективно и вычерчивание схем механизмов на доске без предварительного формирования у студентов связи схем с образами их конструкций. Для ликвидации этого разрыва на первом лабораторном занятии выполняется работа № 1А «Условные обозначения и структурно-конструктивная классификация механизмов» [3], посвященная изучению основных типов механизмов и, в частности, классификации зубчатых механизмов. В процессе выполнения работы студенты знакомятся на стенде (рис.1) с классификацией зубчатых механизмов по взаимному расположению осей.

Также демонстрируются соответствующие движущиеся модели цилиндрических передач (рис. 2, 3), передач с коническими колесами (рис. 4), со скрещивающимися осями (рис. 5, 6, 7). Студенты приобретают навыки изображения кинематических схем механизмов, подготавливаясь этим к восприятию лекционного материала.

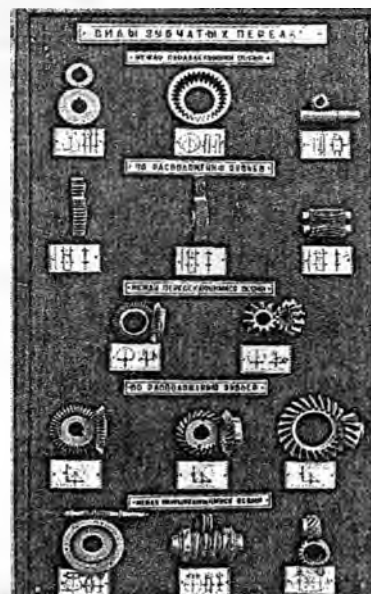
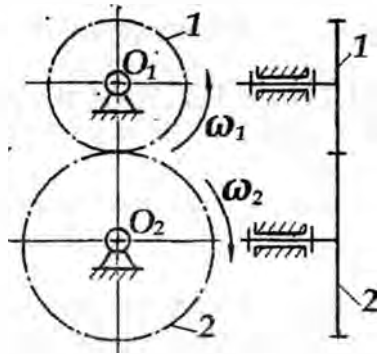
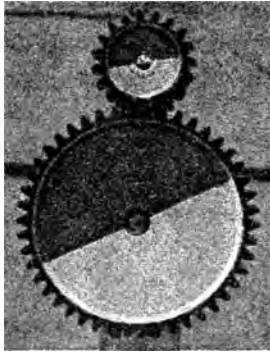


Рис. 1. Классификация механизмов по расположению осей колес

а



б

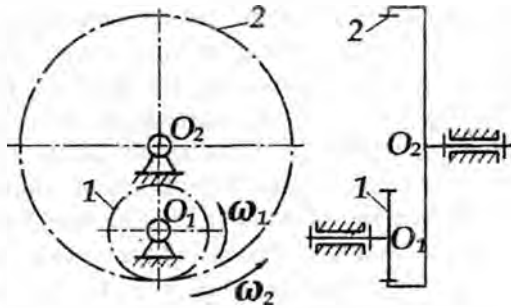


Рис. 2. Вид и схемы цилиндрических зубчатых передач:
а – с внешним зацеплением, б – с внутренним зацеплением

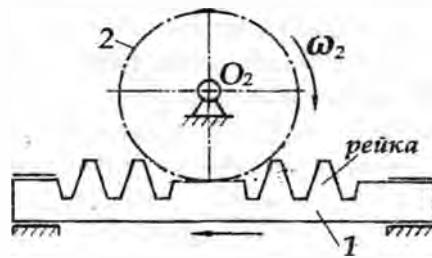
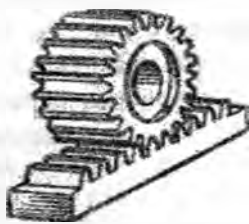


Рис. 3. Вид и схема реечной передачи

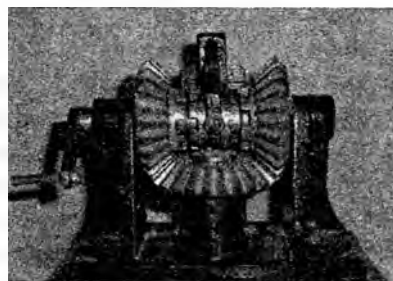
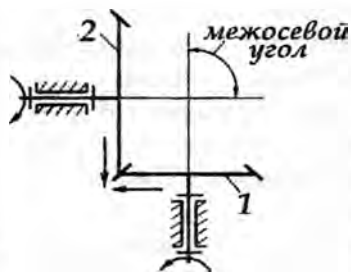


Рис. 4. Вид и схема конической передачи

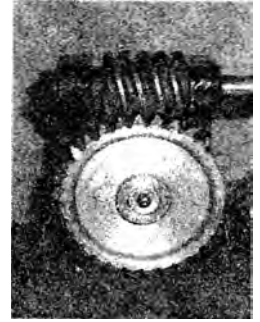
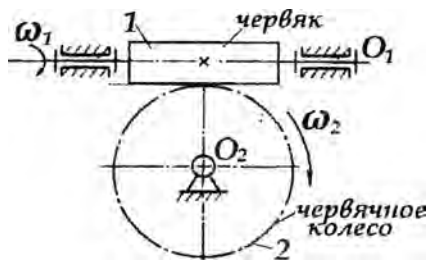


Рис. 5. Вид и схема червячной передачи

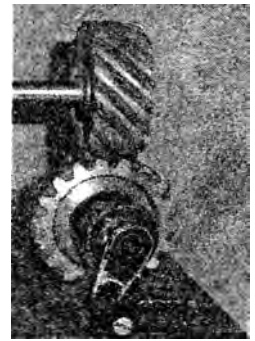
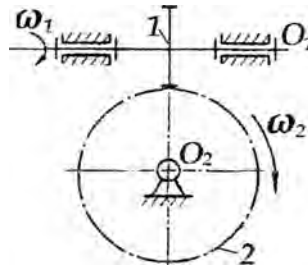


Рис. 6. Вид и схема винтовой передачи

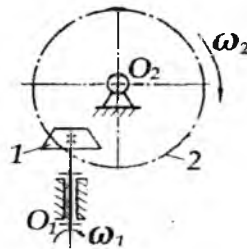
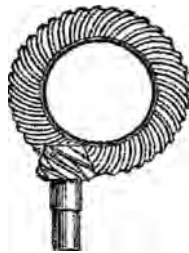


Рис. 7. Вид и схема гипоидной передачи

На лабораторном занятии демонстрируются и другие механизмы, относящиеся к зубчатым (рис. 8, 9).



Рис. 8. Цевочная передача

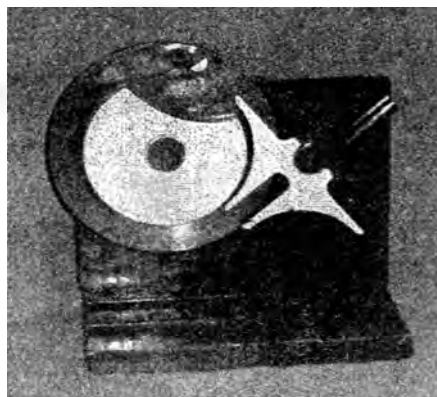


Рис. 9. Механизм мальтийского креста

Овладение навыками самостоятельного составления схем и определения передаточных отношений зубчатых механизмов достигается при выполнении лабораторной работы №4 «Составление схем и кинематический анализ зубчатых механизмов». Студенту предлагается составить кинематические схемы двух механизмов – механизма с неподвижными осями колес (коробка передач) и механизма, в составе которого имеется планетарная передача, а также определить требуемые передаточные отношения.

В процессе домашней подготовки к работе и ее выполнения студент пользуется методическим пособием /6/, которое включает теоретическую, практическую части и контрольные вопросы.

В теоретической части изложены основные положения кинематики зубчатых механизмов, дополненные изображениями моделей и схем механизмов, подробным описанием строения коробки передач, рассмотрением всех вариантов компоновочных схем планетарных и дифференциальных механизмов.

Особое внимание уделено строению автомобильной коробки передач (рис. 10), так как подобные механизмы предлагаются студентам для самостоятельного составления схем (рис. 11) и кинематического анализа. Описываются все конструктивные элементы коробки и способы включения отдельных передач. Для облегчения самостоятельной работы приведена таблица элементов кинематических схем коробок передач с их реальным изображением и условным обозначением (рис. 12).

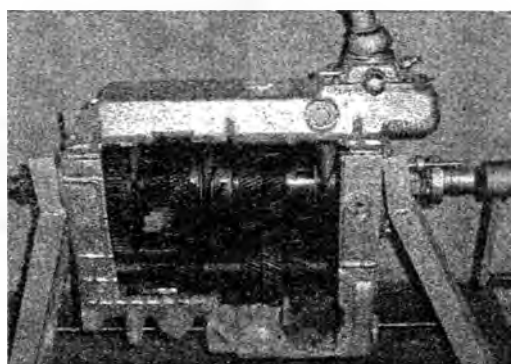
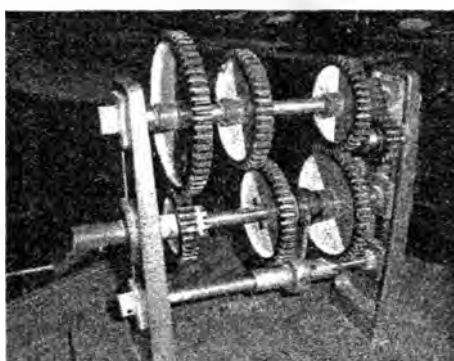


Рис. 10. Примеры моделей коробок передач

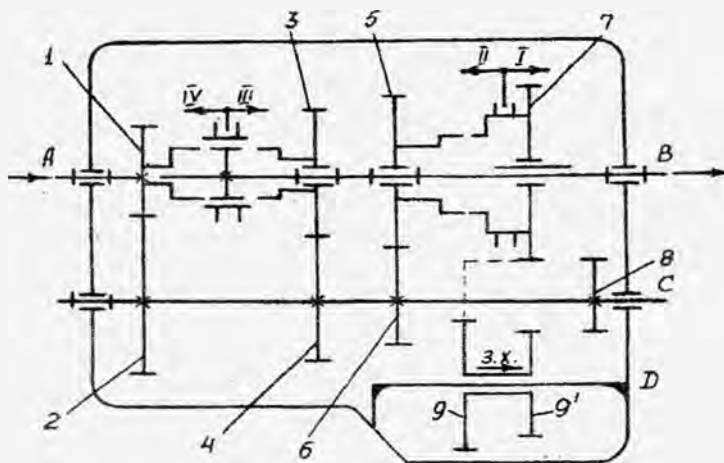


Рис. 11. Пример составленной студентом схемы коробки передач

Исследуя строение коробки в процессе работы, студент последовательно выделяет в ней все конструктивные элементы и, сопоставляя увиденное с упомянутой таблицей, выстраивает свою кинематическую схему. В практической части пособия описан алгоритм действий по выделению конструктивных элементов коробки передач. Эффективность работы на лабораторном занятии зависит от полноты предварительного изучения изложенного в пособии материала. Поэтому проведению лабораторной работы предшествует пятиминутный экспресс-контроль знаний. Студентам предлагается письменно ответить на три контрольных вопроса.

Муфта двухсторонняя		<p>в – ступица с наружными шлицами; г – подвижная часть (синхронизатор) с внутренними шлицами; д и е – правая и левая полумуфты, жестко соединенные с зубчатым колесами</p>			
		нейтральное положение	включение влево	включение вправо	
			вид муфты в реальной коробке передач		

Рис. 12. Фрагмент таблицы

После составления кинематической схемы студентам предлагается определить передаточные отношения коробки для двух указанных преподавателем передач. Пример соответствующего расчета приведен в образце протокола. Затем студенты знакомятся с методикой проверки расчета передаточного отношения по количеству оборотов входного вала на один оборот выходного. Аналогичным образом регламентируется работа по составлению схемы и расчету

передаточного отношения механизма с планетарной ступенью. Руководством для составления схемы является образец протокола и рассмотренные в теоретической части компоновочные схемы механизмов с подвижными осями. Такая организация подготовки и проведения лабораторного занятия подталкивает студента к самостоятельной работе и глубокому осмыслению материала, пониманию строения и методов анализа механизмов. Работа зачитывается при успешном прохождении экспресс-контроля знаний и выполнении в полном объеме практической части с составлением отчета согласно требованиям оформления кинематических схем механизмов.

Закрепление лекционного материала продолжается на практических занятиях, где решаются задачи /2/ определения передаточных отношений и скоростей вращения отдельных звеньев для различных механизмов: ступенчатых и паразитных рядов, планетарных и замкнутых дифференциальных механизмов, а также комбинированных зубчатых механизмов, содержащих элементы всех выше перечисленных. Уделяется внимание кинематике дифференциальных механизмов. Обязательно рассматриваются особенности кинематики ступенчатых рядов и планетарных механизмов с коническими колесами. Предлагаются задачи для самостоятельной работы, как в аудитории, так и в виде домашнего задания.

Итогом изучения раздела «Кинематика зубчатых механизмов» является проведение коллоквиума. На нем студенту предлагается ответить на теоретические вопросы и решить задачи. Результаты коллоквиума учитываются при выставлении итоговой оценки курсу теории механизмов и машин.

Многообразие зубчатых механизмов и широкое применение их в технике позволяет рекомендовать данный раздел для углубленного изучения в рамках научно-исследовательской работы студентов. Как объект изучения при написании рефератов предлагаются волновые передачи, механизмы прерывистого движения (мальтийские и храповые), планетарные коробки передач, особенности строения и кинематики зубчатых механизмов в различных отраслях техники. Глубокая проработка дополнительного материала и написание оригинальных рефератов позволяет студенту повысить итоговую экзаменационную оценку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. - 4-е изд. - М.: Наука, 1988. - 640 с.
2. Артоболевский, И. И. Сборник задач по теории механизмов и машин / И.И. Артоболевский, Б. В. Эдельштейн. - 2-е изд.-М.: Наука, 1975. - 256 с.
3. Структура механизмов: Учебно-методическое пособие к лабораторным работам по дисциплине «Теория механизмов, машин и манипуляторов» / П.П. Анципорович [и др.]. - Минск: БНТУ, 2008. - 33 с.
4. Лабораторные работы по теории механизмов и машин / Е.А. Камцев [и др.]; под общ. ред. Е.А. Камцева. - Минск: Вышэйшая школа, 1976. - 174 с.
5. Акулич, В.К. Зубчатые передачи. Текст лекций / В.К. Акулич, Н.И. Мицкевич, О.Н. Цитович. - Минск: БПИ, 1973. - 95 с.
6. Кинематика зубчатых механизмов: учебно-методическое пособие к лабораторным работам по дисциплине «Теория механизмов, машин и манипуляторов» / П.П. Анципорович [и др.]. - Мн.: БНТУ, 2010. - 26 с.

УДК 621.01

Анципорович П.П., Акулич В.К.

УЧЕТ ТРЕНИЯ ПРИ СИЛОВОМ РАСЧЕТЕ МЕХАНИЗМОВ И СОСТАВЛЕНИИ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Введение сил трения в уравнения кинетостатики приводит к увеличению числа неизвестных компонент реакций в кинематических парах, а количество уравнений при этом остается неизменным. Поэтому, чтобы задача силового анализа оказалась разрешимой, необходимо вводить дополнительные условия, число которых равно числу добавочных неизвестных. Эти

дополнительные условия, определяющие характер распределения нормальных реакций, выбираются с учетом конкретных особенностей кинематической пары.

Например, в поступательных кинематических парах нормальные составляющие реакций могут распределяться некоторым образом на одной из двух контактных плоскостей или по обеим плоскостям. Возможность перекоса ползуна может быть учтена только при использовании модели контакта по обеим плоскостям.

Силовой расчет механизмов с учетом трения сводится к совместному решению уравнений кинетостатики, содержащих силы трения в качестве дополнительных неизвестных, и соотношений, полученных при рассмотрении соответствующих моделей кинематических пар с трением. При этом полная система уравнений силового анализа оказывается нелинейной, что вызывает существенные осложнения при их решении. Кроме того, система уравнений может иметь несколько решений, и определить, какое из решений будет соответствовать действительным значениям реакций и движущих сил, достаточно сложно.

Во многих случаях эффективным способом учета трения при силовом анализе механизмов является предложенный академиком И.И. Артоболовским метод последовательных приближений [1]. Согласно этому методу вначале выполняется силовой расчет без учета трения. Затем, получив значения реакций в кинематических парах, можно найти соответствующие силы и моменты сил трения, которые вносятся в уравнения кинетостатики. В результате повторного решения этих уравнений получаются уточненные значения реакций, действующих в кинематических парах (первое приближение). По полученным в первом приближении значениям сил можно снова определить силы и моменты сил трения, а затем выполнить расчет во втором приближении и получить еще более точные значения реакций в кинематических парах. Такой процесс можно продолжать и дальше в зависимости от требуемой степени точности расчета. Опыт показывает, что часто достаточно только первого приближения.

Рассмотрим изложенную методику на примере кривошипно-ползунного механизма (рис. 1). К ползуну 3 приложена сила полезного (технологического) сопротивления F_3 . Вначале известным способом [2] определяются реакции в кинематических парах R_{10} , R_{21} , R_{23} , R_{30} и уравновешивающий (движущий) момент $M_{\text{пр}}$. По ним вычисляются моменты трения во вращательных кинематических парах и сила трения в поступательной паре:

$$M_{T10} = -R_{10}f_O r_O \text{sign}(\omega_1),$$

$$M_{T21} = -R_{21}f_A r_A \text{sign}(\omega_{21}),$$

где $\omega_{21} = \omega_2 - \omega_1$ – относительная угловая скорость,

$$M_{T23} = -R_{23}f_B r_B \text{sign}(\omega_2),$$

$$M_{T30} = -|R_{30}|f_n \text{sign}(V_B).$$

Здесь f_O , f_A , f_B , f_n – приведенные коэффициенты трения в кинематических парах, r_O , r_A , r_B – радиусы цилиндрических элементов вращательных кинематических пар.

Расчетные схемы для силового анализа структурной группы (2.3), звена 2 и начального звена 1 показаны на рис. 2,3,4. Все силы и моменты, кроме сил тяжести звеньев G_1 , G_2 , G_3 показаны в положительном направлении. Их действительные направления укажут знаки «плюс» или «минус» после выполнения конкретных числовых расчетов.

Последовательно используем следующие уравнения кинетостатики: $\sum F_{ix} = 0$ для группы (2, 3), $\sum M_B(F_i) = 0$ для звена 2, $\sum F_{iY} = 0$ для группы (2, 3), $\sum F_{ix} = 0$ и $\sum F_{iY} = 0$ для звена 2, $\sum F_{ix} = 0$, $\sum F_{iY} = 0$ и $\sum M_O(F_i) = 0$ для звена 1.

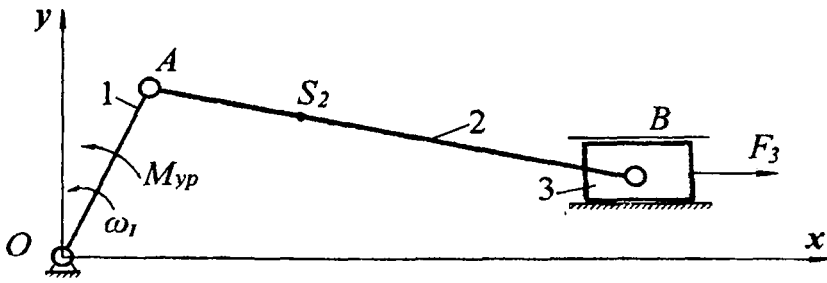


Рис. 1. Схема исследуемого кривошипно-ползунного механизма

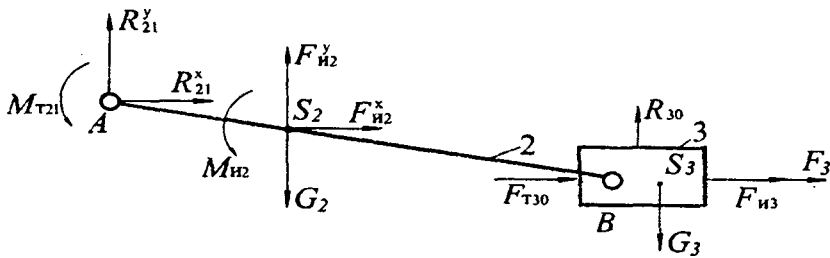


Рис. 2. Расчетная схема группы Ассура (2, 3)

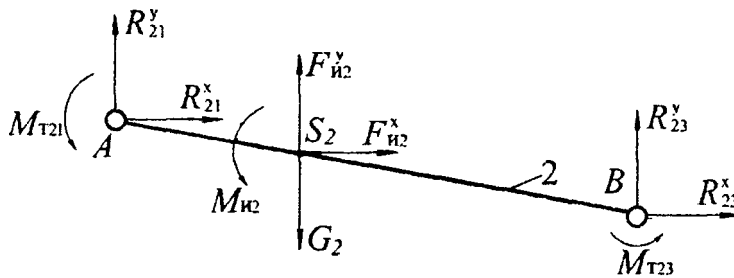


Рис. 3. Расчетная схема звена 2

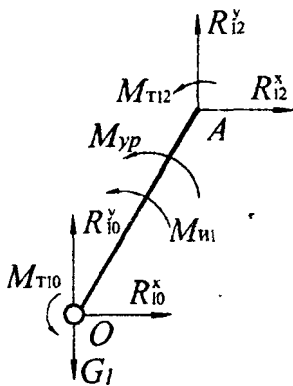


Рис. 4. Расчетная схема звена 1

Таким образом, из выражения $\sum F_{ix} = F_{u2x} + F_{u3} + F_3 + F_{T30} + R_{21}^x = 0$ определяется R_{21}^x .

Из выражения

$$\begin{aligned} \sum M_B(F_i) = & R_{21}^y (X_A - X_B) + (F_{u2}^y - G_2) \cdot (X_{S_2} - X_B) - \\ & - R_{21}^x \cdot (Y_A - Y_B) - F_{u2}^x \cdot (Y_{S_2} - Y_B) + \\ & + M_{u2} + M_{T21} + M_{T23} = 0 \end{aligned}$$

определяется R_{21}^y .

Реакция R_{30} определяется из уравнения $\sum F_{iy} = F_{u2}^y + R_{21}^y - G_2 - G_3 + R_{30} = 0$.

Реакция R_{23}^x определяется из уравнения $\sum F_{ix} = R_{23}^x + F_{u2}^x + R_{21}^x = 0$.

Реакция R_{23}^y определяется из уравнения $\sum F_{iy} = R_{23}^y + F_{u2}^y - G_2 + R_{21}^y = 0$.

Реакция R_{10}^x определяется из уравнения $\sum F_{ix} = R_{10}^x + R_{12}^y = 0$.

Реакция R_{10}^y определяется из уравнения $\sum F_{iy} = R_{10}^y + R_{12}^y - G_1 = 0$.

Из уравнения

$$\sum M_0(F_i) = R_{12}^y X_A - R_{12}^x Y_A + M_{u1} + M_{T12} + M_{T10} + M_{yp} = 0$$

определяется M_{yp} . При этом следует учесть, что

$$R_{12}^x = -R_{21}^x, R_{12}^y = -R_{21}^y, M_{T12} = -M_{T21}.$$

По полученным значениям проекций реакций можно найти полные реакции и их направления. Например,

$$R_{10} = \sqrt{(R_{10}^x)^2 + (R_{10}^y)^2},$$

$$\cos \varphi_{R_{10}} = \frac{R_{10}^x}{R_{10}}, \quad \sin \varphi_{R_{10}} = \frac{R_{10}^y}{R_{10}}.$$

Для составления уравнения движения звена приведения с учетом трения следует разделить приведенный момент от сил трения M_{Π}^T из условия равенства мощностей

$$M_{\Pi}^T \omega_1 = N_T,$$

где N_T – общие потери мощности на трение во всех кинематических парах.

$$N_T = -|M_{T10} \omega_1| - |M_{T21} \omega_{21}| - |M_{T23} \omega_2| - |F_{T30} V_B|.$$

В результате получим

$$M_{\Pi}^T = -|M_{T10}| - |M_{T21}(i_{21} - 1)| - |M_{T23} i_{21}| - |F_{T30} i_{31}|,$$

где i_{21} и i_{31} – передаточные функции (аналоги скоростей).

Полученное выражение M_{Π}^T включается в дифференциальное уравнение движения звена приведения

$$J_{\Pi} \frac{d\omega_1}{dt} + \frac{\omega_1^2}{2} \cdot \frac{dJ_{\Pi}}{d\varphi_1} = M_{\Pi}^D + M_{\Pi}^C + M_{\Pi}^T,$$

где M_{Π}^D и M_{Π}^C – приведенные моменты движущих сил и сил полезного сопротивления,

J_{Π} – приведенный момент инерции. M_{Π}^D , M_{Π}^C и J_{Π} находятся путем использования известных методов приведения сил и масс.

Для численного решения дифференциального уравнения движения и определения закона движения $\omega_1(\varphi_1)$ дифференциальное уравнение представляется в виде

$$\frac{d\omega_1}{d\varphi_1} = \frac{M_{\Pi}^D + M_{\Pi}^C + M_{\Pi}^T - \frac{\omega_1^2}{2} \cdot \frac{dJ_{\Pi}}{d\varphi_1}}{J_{\Pi}\omega_1}.$$

На кафедре теории механизмов и машин БНТУ разработано соответствующее программное обеспечение, позволяющее выполнить силовой расчет и определить закон движения механизмов с учетом трения в кинематических парах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. – 4-е изд. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
2. Динамика машин и механизмов в установившемся режиме движения / П.П. Анципорович [и др.]. – Минск: БНТУ, 2008. – 42 с.
3. Механика машин / И.И. Вульфсон [и др.]; под ред. Г.А. Смирнова. – М.: Высш. шк., 1996. – 511 с.
4. Теория механизмов и механика машин / К.В. Фролов [и др.]; под ред. К.В. Фролова. – 5-е изд. – М.: Высшая школа, 2005. – 496 с.

УДК 621.01

Анципорович П.П., Дворянчикова А.Б, Галаев К.О.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА ПО ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В курсовом проекте по теории механизмов, машин и манипуляторов предусмотрено рассмотрение таких вопросов, как динамика машинного агрегата, динамический анализ основного исполнительного механизма машины, синтез кулачкового механизма. Они решаются в пояснительной записке и на трех листах чертежей формата А1. Ранее значительная часть работ выполнялась графическими методами /1, 3/. В настоящее время широкое применение получили аналитические методы проектирования и исследования /2, 5/, на основе которых разработаны алгоритмы расчетов и соответствующие им программные продукты. Используя их, можно решить достаточно сложные задачи современной механики и проанализировать результаты. Пользователь при этом зачастую не имеет достаточного представления о том, какие модели исследования положены в основу, каковы их достоинства и недостатки. Усовершенствовать или разрабатывать программное обеспечение можно только при совместной работе специалистов в областях информационных технологий, теории механизмов и машин, компьютерной механики. Приобретению студентами умений моделирования механизмов и машин, алгоритмизации динамических процессов, синтеза механизмов способствует процесс курсового проектирования по теории механизмов и машин. Блок-схема динамического исследования машинного агрегата (рис. 1) является достаточно сложной.



Рис. 1. Блок-схема динамического исследования машинного агрегата

Инновационность современной методики проектирования заключается в гармоничном сочетании графических и аналитических методов проектирования, позволяющем избежать роста трудозатрат студентов. Дело в том, что, считая аналитические методы в проектировании основными, их необходимо, в первую очередь, использовать для облегчения рутинных, повторяющихся процессов расчетов. Алгоритмы расчетов, разрабатываемые студентом, не должны быть сложными и громоздкими, чтобы студент при желании мог написать простейшие программы на любом известном ему алгоритмическом языке. Если же применяются готовые программы, то они должны иметь обучающую направленность, обеспечивающую вывод на экран графического материала (графиков, движущихся объектов), позволяющего студентам глубже усвоить используемые алгоритмы исследования. Графические методы решения целесообразно применять в двух случаях. Во-первых, если аналитическое решение какой-либо задачи в проекте достаточно сложное и не содержит повторяющихся расчетов. Во-вторых, графические методы используют в минимальном объеме для закрепления теоретических знаний и для сравнения аналитических и графических результатов.

Так при динамическом синтезе и анализе машинного агрегата (рис. 2) в пояснительной записке производится геометрический синтез размеров механизма [4], вычисляются их чертежные размеры, начальная обобщенная координата кривошипа, соответствующая левому крайнему положению ползуна, после чего на листе 1 вычерчиваются планы положений механизма. Далее, используя полученную разметку хода ползуна, строится механическая характеристика технологического процесса, откуда получают значения сил полезного сопротивления. Графически строится также план аналогов скоростей (только для одного положения), затем для этого же положения аналитически выполняется контрольный расчет. Полное же исследование аналогов скоростей за цикл движения осуществляется на ЭВМ. Аналогично определяются и другие параметры. Полученные с помощью ЭВМ результаты исследований динамики машины за цикл движения изображаются в виде графиков на чертеже.

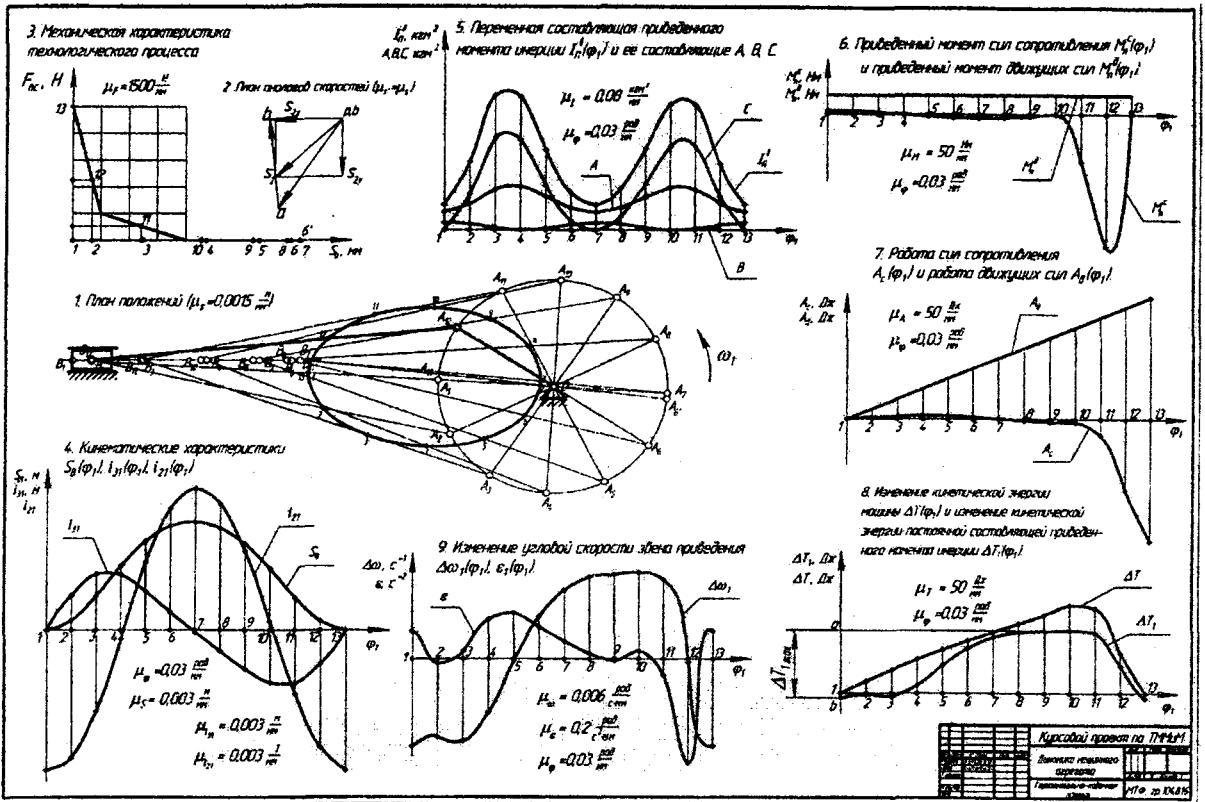


Рис. 2. Лист 1 «Динамика машинного агрегата»

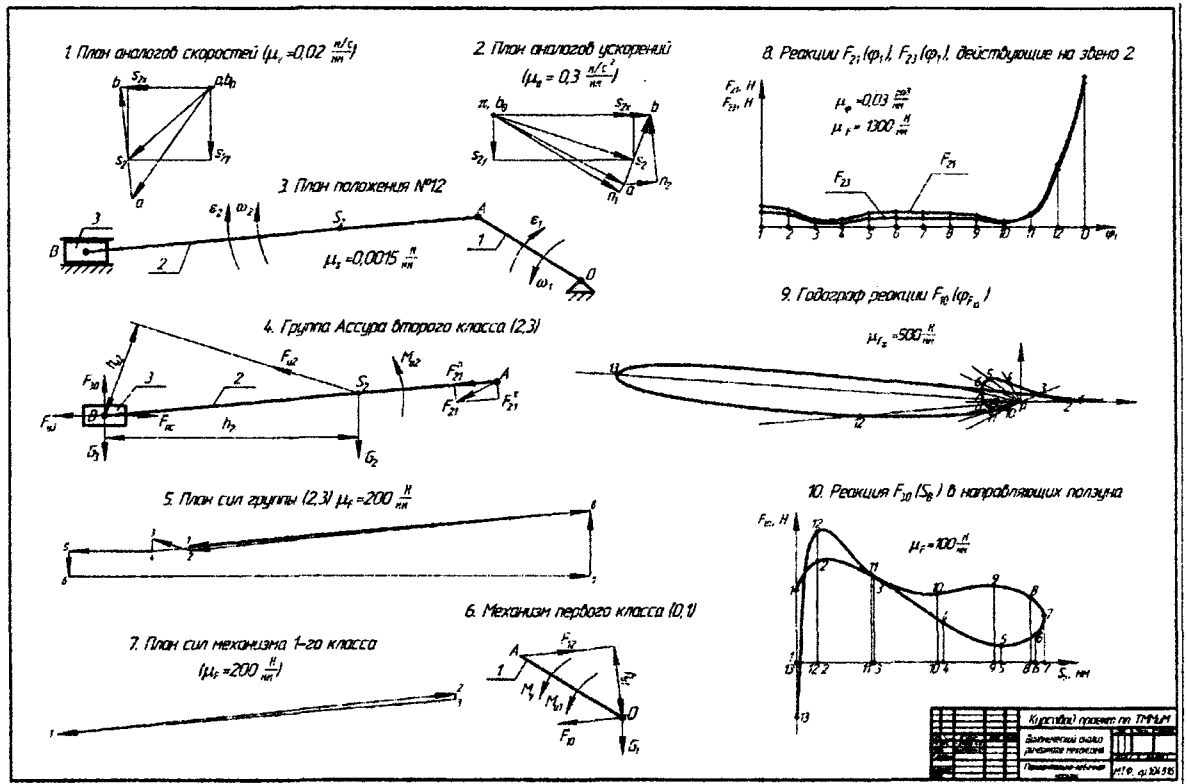


Рис. 3 «Динамический анализ рычажного механизма»

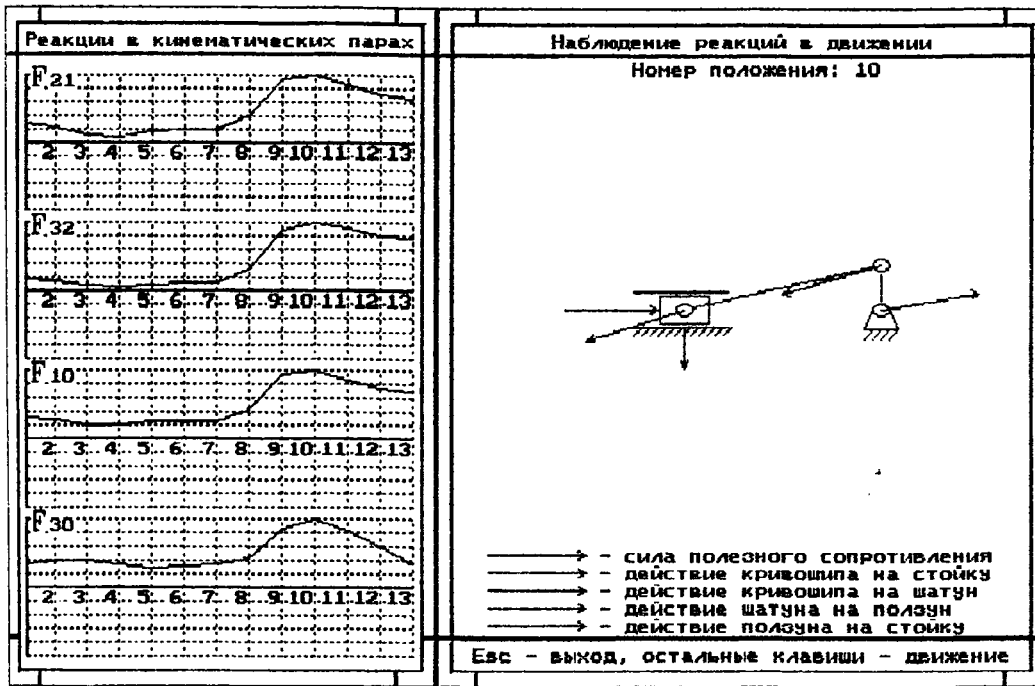


Рис. 4 Реакции в кинематических парах механизма

Динамический анализ основного исполнительного механизма выполняется графически

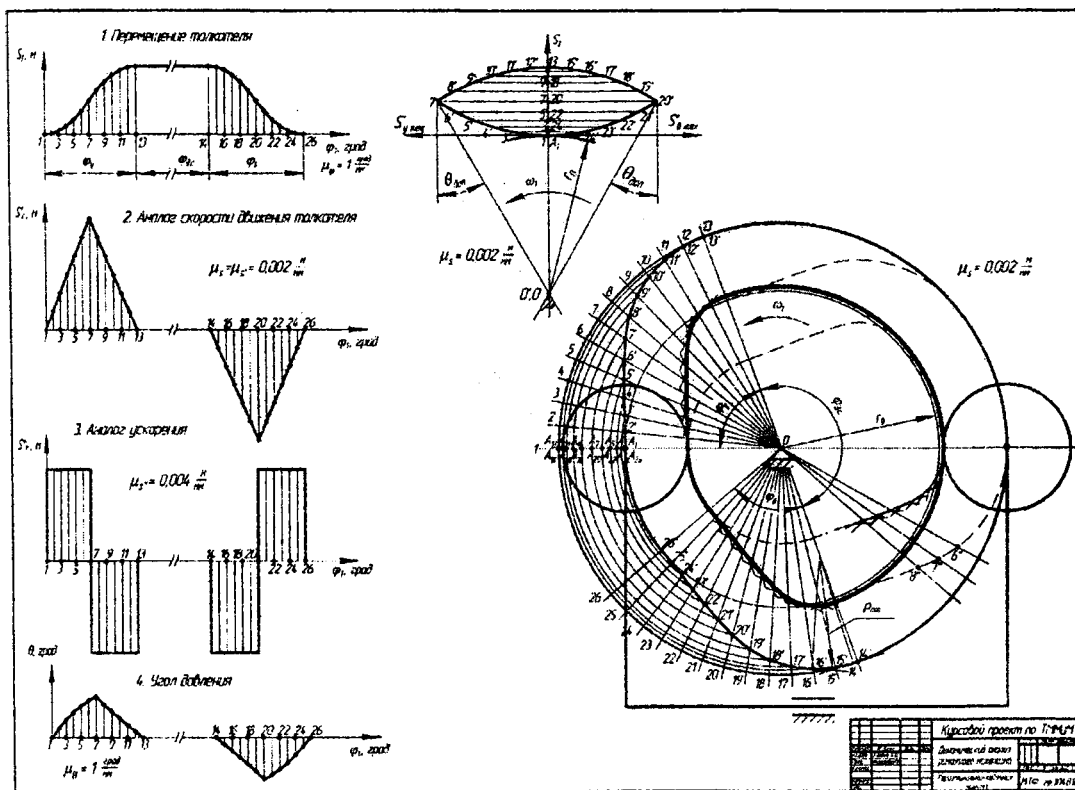


Рис. 5. Лист 3 «Динамический синтез кулачкового механизма»

только для одного (контрольного) положения. Так как в силовом расчете учитываются инерционные нагрузки, предварительно строятся планы скоростей и ускорений. Для этого же положения по разработанному студентом алгоритму вручную выполняется аналитический контроль

ный расчет. На листе 2 (рис. 3), используя результаты расчетов на ЭВМ, графически строятся годографы реакций в кинематических парах, график реакции в направляющих ползуна. Разработанные на кафедре программы позволяют анимировать изображение механизма с показом в масштабе реакций в кинематических парах (рис. 4). Анализ характера изменения реакций за цикл движения имеет наибольшую ценность для конструктора, поскольку позволяет определить предполагаемый износ в подвижных соединениях.

Динамический синтез кулачкового механизма для определения основных размеров механизма требует вычисления функций положения толкателя, аналогов скорости и ускорения. В данном случае, как и при выполнении других листов, вручную данные параметры рассчитываются только для одного положения на фазах удаления и возвращения. Несмотря на то, что в результатах работы программы имеются координаты центрального и действительного профилей кулачка, для лучшего понимания работы механизма построение профилей производится графическим методом обращенного движения.

Для облегчения проектирования разработаны методические пособия /4/, /5/ и компьютерные программы по всем разделам курсового проекта. Интерактивный характер работы программ позволяет обучаемым в процессе проектирования изменять любые входные параметры и исследовать их влияние на результаты проектирования.

Студенты допускаются к работе на ЭВМ только в случае своевременного и качественного выполнения контрольных расчетов.

Практика применения изложенных технологий показала улучшение знаний студентов и ритмичности выполнения проекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. – 4-е изд. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
2. Филонов И.П., Анципорович П.П., Акулич В.К. Теория механизмов, машин и манипуляторов. – Мн.: Дизайн Про, 1998. – 655 с.
3. Курсовое проектирование по теории механизмов и машин / Под общ. ред. Г.Н. Девойно. – Мн.: Высш. шк., 1986. – 285 с.
4. Анципорович, П.П. Синтез кривошипно-ползунных механизмов: Учебно-метод. пособие к курсовому проектированию для студ. механических спец. / П.П. Анципорович, В.К. Акулич, Е.М. Дубовская – Мн.: БНТУ, 2005. – 22 с.
5. Анципорович П.П. Динамика машин и механизмов в установившемся режиме движения: Учебно-метод. пособие по курсовому проектированию по дисц. «Теория механизмов, машин и манипуляторов»/ П.П. Анципорович, В.К. Акулич, А.Б. Дворянчикова, Е.М. Дубовская. – Мн.: БНТУ, 2007. – 40 с.

УДК 621.01.752

Анципорович П.П., Кудин В.В.

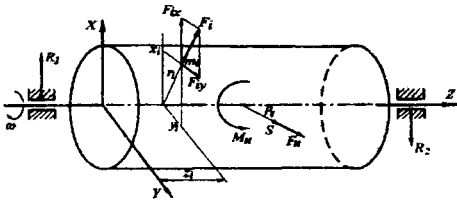
УРАВНОВЕШИВАНИЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЗВЕНЬЕВ В ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

При движении механической системы под действием внешних сил в ней могут возникать механические колебания и вибрации, причинами которых являются как периодические изменения сил в машинах, так и кинематические возмущения либо инерционные характеристики звеньев. Одна из основных причин виброактивности механической системы является собственная неуравновешенность как звеньев, так и механизма в целом.

В курсе «Теория механизмов и машин» уделено значительное внимание вопросам выявления неуравновешенности ротора, как тела, которое при вращении удерживается своими несущими поверхностями в опорах. В зависимости от числа опор рассматриваются как двух-,

так и многоопорные. Теоретическое обоснование неуравновешенности ротора сводится к тому, что элементарные силы инерции точечных масс ротора образуют пространственную систему сил, которая сводится к главному вектору центробежных сил инерции \bar{F}_u , приложенному к центру масс S , и главному моменту сил инерции \bar{M}_u , действующих в разных плоскостях (рис. 1).



$$\bar{F}_u = \omega^2 \bar{D}, \quad (1)$$

$$M_u = \omega^2 M_D, \quad (2)$$

где $\bar{D} = \sum \overline{m_i r_i} = \overline{m_p \rho_S}$ – главный вектор

дисбалансов ротора;

$$\bar{M}_D = \sqrt{I_{xz}^2 + I_{yz}^2} \text{ – главный момент дисбалансов ротора;}$$

Рис. 1. Общая схема сил инерции ротора

$m_p = \sum m_i$ – масса ротора;

ρ_S – эксцентриситет ротора;

I_{xz}, I_{yz} – центробежные моменты инерции.

Векторы \bar{F}_u и \bar{M}_u вызывают динамические реакции в подшипниках ротора, которые передаются станине машины и фундаменту, причем \bar{F}_u и \bar{M}_u вращаются вместе с ротором. Вследствие этого возникают механические колебания ротора в опорах.

Не подверженный действию внешних сил ротор, вращающийся с постоянной скоростью, находится в состоянии динамического равновесия, характеризуемого равенством нулю главного вектора \bar{F}_u и главного момента сил инерции \bar{M}_u , т.е.

$$\bar{F}_u = \omega^2 \bar{D} = 0, \quad (3)$$

$$M_u = \omega^2 M_D = 0, \quad (4)$$

На основании условий (3) и (4) определяются виды неуравновешенности: статическая, моментная и динамическая, причинами которой являются дефекты, связанные с нарушением технологии изготовления, сборки и балансировки ротора после сборки с заменой или перестановкой деталей в процессе монтажа, характеризующиеся повышенной вибрацией непосредственно по завершению ремонта или монтажа оборудования, а также дефекты эксплуатации, как разрушение и «вылет» частей ротора (например, частей рабочего диска, лопаток турбины) в процессе работы, характеризующиеся внезапными однократными скачкообразными изменениями амплитуды и/или фазы вибрации, и различные виды износа поверхностей ротора (например, износ шлифовальных кругов, шеек вала, лопастей колес), уменьшение натяга (нарушение посадок) деталей вала. Все это ведет к изменению амплитуды и/или фазы колебания оси вала ротора.

Статическая неуравновешенность характеризуется таким распределением масс ротора, при котором ось вращения ротора и главная ось инерции параллельны (рис. 2). При этом $\bar{D} \neq 0$, а $M_D = 0$. Направление главного вектора D совпадает с направлением главного вектора сил инерции \bar{F}_u , действующего на ротор при вращении.

Статическую неуравновешенность легко выявить опытным путем, так как под действием сил тяжести ротор стремится к устойчивому положению равновесия, когда его центр масс S занимает наиболее низкое положение.

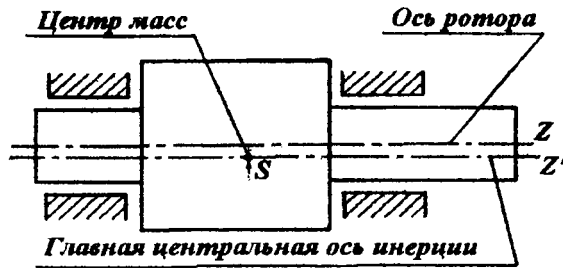


Рис. 2. Статическая неуравновешенность

Моментная неуравновешенность характеризуется таким распределением масс ротора, при которой ось вращения ротора и его главная центральная ось инерции пересекаются в центре масс ротора (рис. 3), т.е. $\bar{D} = 0$, а момент дисбаланса $M_D \neq 0$, следовательно, $I_{xz} \neq 0, I_{yz} \neq 0$. Моментная неуравновешенность обнаруживается только при вращении ротора.

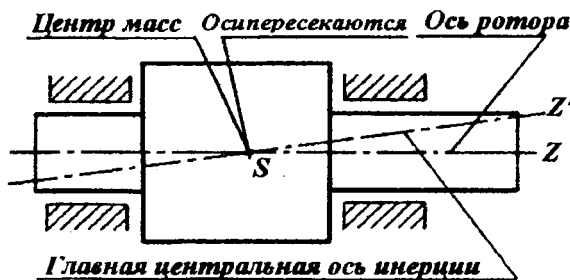


Рис. 3. Моментная неуравновешенность ротора

Динамическая неуравновешенность ротора – это наиболее общий случай неуравновешенности, при этом $\bar{D} \neq 0$ и $M_D \neq 0$, а ось вращения ротора и главная центральная ось инерции скрещиваются в пространстве (рис. 4). Как видно, динамическая неуравновешенность включает как статическую, так и моментную неуравновешенность одновременно.

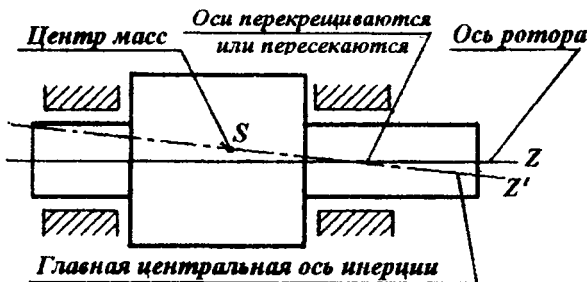


Рис. 4. Динамическая неуравновешенность ротора

Идеальный ротор будет передавать на свои опоры и далее на раму только статические нагрузки от собственного веса, т.е. вращающийся ротор должен оказывать на опоры такое же воздействие, как и неподвижный. Для создания такого состояния в процессе проектирования роторов необходимо стремиться выбрать наиболее правильные решения в конструкциях и технологиях их изготовления, добиваясь их массово-геометрической симметрии.

Так, например, при изготовлении ротора с малой осевой протяженностью и его установке на ось вращения (рис. 5, а) необходимо,

чтобы посадочное отверстие и внешний размер были концентричными, а ось вращения – перпендикулярной плоскости ротора. Несоблюдение первого требования приведет к появлению статической неуравновешенности (рис. 5, б), второго – моментной (рис. 5, в), обоих – динамической.

Таким образом, ротор, который, казалось бы, уравновешен, в действительности имеет ту или иную неуравновешенность. Для устранения ее вводят дополнительную технологическую операцию – балансировку.

Балансировка – технологическая операция, направленная на опытное обнаружение неуравновешенности ротора и ее уменьшение до допустимой величины.

Для жестких роторов неуравновешенность заменяется эквивалентной системой двух дисбалансов, расположенных в двух поперечных сечениях ротора, тогда ротор всегда может быть приведен в состояние динамического равновесия с помощью двух корректирующих масс (противовесов), расположенных в двух произвольных плоскостях коррекции, перпендикулярных оси вращения ротора. Измерение дисбаланса и уменьшение его при балансировке можно производить последовательно, как самостоятельные операции, так и одновременно. Балансировку выполняют двумя методами: а) перераспределением масс в плоскостях коррекции (установкой двух противовесов); б) коррекцией положения оси ротора.

Дисбалансы ротора, имеющие место до и после балансировки называют соответственно начальным и остаточным дисбалансами.

Наибольший остаточный дисбаланс, приемлемый по нормам балансировки, называется допустимым дисбалансом.

В реальных машинах практически невозможно полностью устранить остаточный дисбаланс ротора. С повышением точности балансировки увеличивается время и затраты на ее проведение. Точность балансировки должна соответствовать точности изготовления ротора, поэтому назначаемые допустимые дисбалансы выбираются с учетом требований эксплуатации, технических возможностей производства и экономической целесообразности и оговорены стандартами. Так, например, допустимые дисбалансы роторов электрических машин определяются ГОСТом 12327–79, а для шлифовальных кругов – ГОСТ 3060–75.

По видам неуравновешенности различают статическую, моментную и динамическую балансировки.

Статическая балансировка допустима для роторов, у которых отношение длины ротора к его диаметру равно $0,20 \div 0,25$ и выполняется на простейших устройствах, как, например, параллельных горизонтальных призмах (рис.6, а), либо на двухдисковых устройствах (рис.6. б).

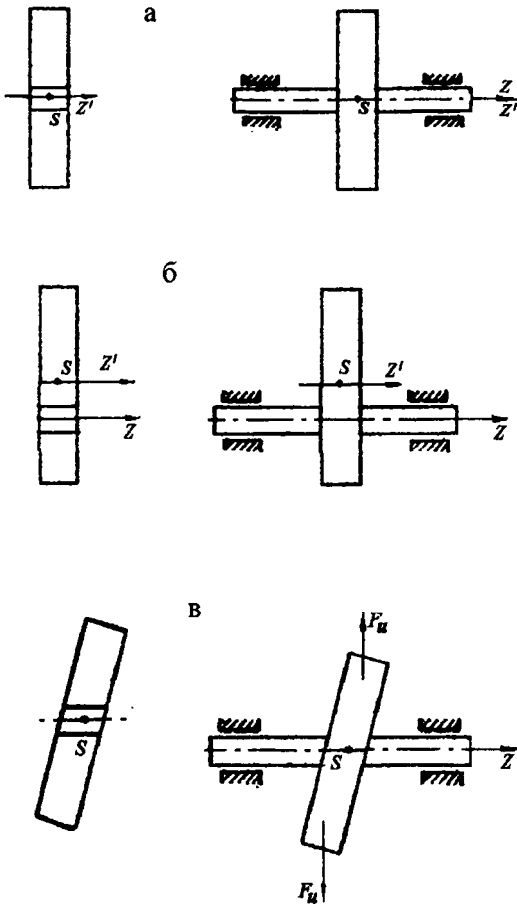


Рис. 5. Появление неуравновешенности ротора за счет нарушений технологии изготовления и сборки

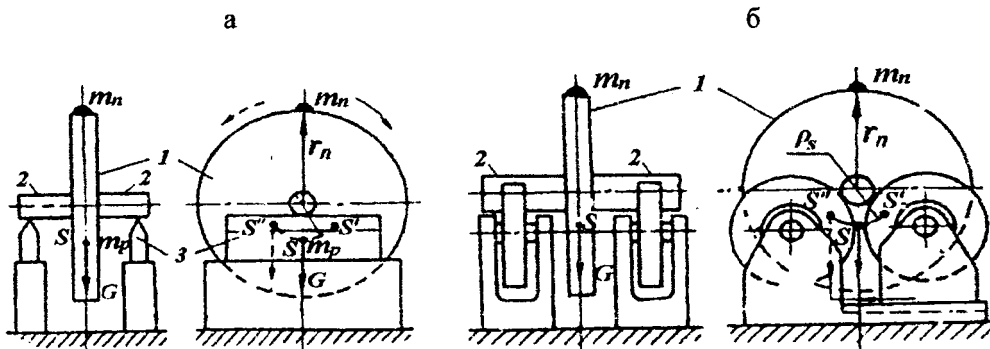


Рис. 6. Балансировка на параллельных призмах (а) и на двухдисковом

Статическая балансировка в динамическом режиме выполняется на специальных станках, при этом в процессе вращения ротора регистрируется его дисбаланс [1].

Динамическая балансировка выполняется экспериментальным путем на специальных балансировочных станках [2]. Существует классификация станков по числу степеней свободы ротора (рис.7), а также по характеру режима работы и конструктивному исполнению, которые подразделяются на балансировочные станки дорезонансного, резонансного и зарезонансного типов [3].

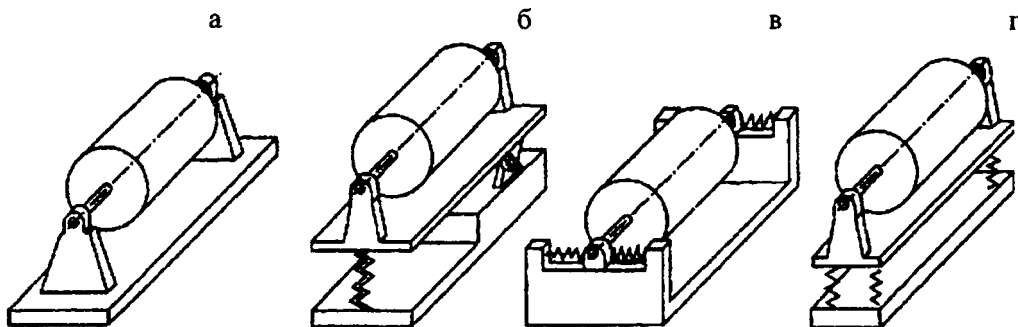


Рис. 7. Классификация станков по степеням свободы ротора

В заключении хотелось бы отметить, что в республике Беларусь технические ВУЗы не готовят инженеров по таким специальностям, поэтому в курсе ТММ необходимо больше внимания уделить вопросам динамической балансировки нормам допустимой остаточной неуравновешенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория механизмов и машин / К.В. Фролов [и др.]; под ред. К.В. Фролова. – 5-е изд. – М.: Высшая школа, 2005. – 496 с. 2. Вибрации в технике: Справочник в 6 т./К.В. Фролов; под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – т.6. – 456 с. 3. Балансировка вращающихся масс: учебно-методическое пособие к лабораторным работам по дисциплине «Теория механизмов, машин и манипуляторов» / П.П. Анципорович [и др.]. – Минск: БНТУ, 2009. – 27 с

УДК 621.01: 681.3 + 621.876

Астахов Э.И., Гарах В.А., Шкурко С.С.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ПРИВОДОВ МЕХАНИЗМОВ НОЖНИЧНЫХ ПОДЪЕМНИКОВ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Для подъема и опускания крупных грузов в стесненных производственных и складских помещениях широко используются ножничные подъемники, содержащие шарнирно-рычажные антипараллелограммные механизмы, которые обеспечивают вертикальные перемещения грузовой площадки. Такие механизмы имеют от одной до шести секций антипараллелограммов, являющихся умножителями вертикальных перемещений первой нижней секции. Привод таких одно- и многосекционных механизмов ножничных подъемников осуществляется, чаще всего, одним или несколькими гидроцилиндрами по различным схемам расположения ведущих цилиндров. Ранее в работах [1, 2, 3] авторов рассмотрены вопросы структуры и кинематики, динамики подъема, силовой нагруженности таких шарнирных механизмов ножничных подъемников. Задачей данной работы является сравнительный анализ существующих и предлагаемых схем приводов ножничных подъемников.

Все выпускаемые ножничные подъемники содержат следующие обязательные узлы: одно- или многосекционный механизм 1 шарнирного антипараллелограмма, рабочая площадка 2 с поднимаемым грузом Q , привод 3 ведущего звена, корпус (стойка) 4 (рис. 1).

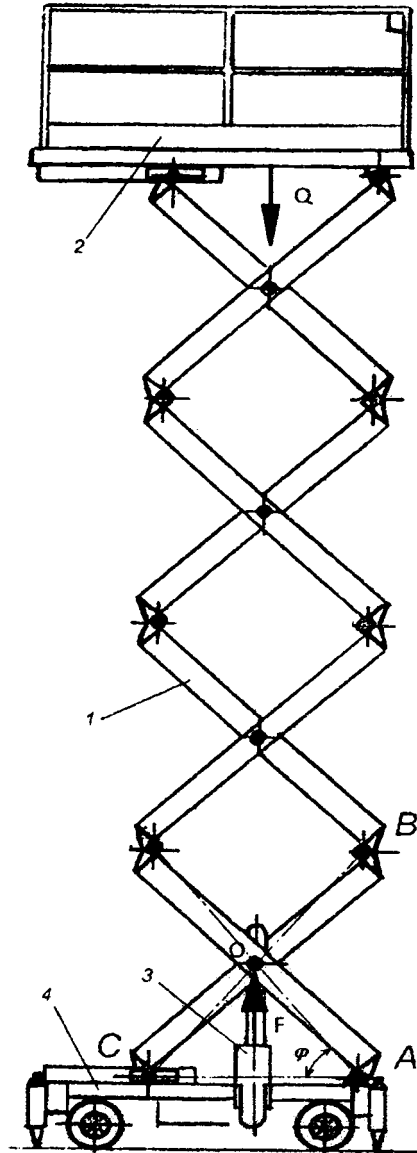


Рис. 1. Схема ножничного механизма с центральным вертикальным расположением привода

2 с поднимаемым грузом Q , привод 3 ведущего звена, корпус (стойка) 4 (рис. 1). Чаще всего в качестве привода используют гидроцилиндры, приводящие в поступательное движение одно из подвижных звеньев шарнирного антипараллелограмма. Используемые схемы ведущих силовых цилиндров различаются схемой расположения и точкой приложения движущей силы. Покажем сравнительный анализ наиболее часто используемых схем приводов.

Одним из основных сравниваемых параметров приводов является максимальная сила F_{\max} на ведущем цилиндре для подъема заданного груза весом Q . Покажем сравнительный анализ величин F_{\max} при заданном Q , приняв в качестве обобщенной координаты угол φ_1 поворота рычага 1. Используем равенство элементарных работ dA на площадке dA_{Π} и на ведущем 1-ом звене dA_1 :

$$dA_{\Pi} = dA_1 \tag{1}$$

В схеме на рисунке 1 сила F ведущего звена 1 приложена посередине вертикально в точке O , в которой $ds_1 = \frac{l}{2} \sin \varphi_1$.

Как получено в работе [2] величина элементарного перемещения dS_n на рабочей площадке n -ой секции антипараллелограмма будет равно:

$$dS_n = n \cdot dS_1 = nl \sin \varphi_1,$$

где l – длина рычага антипараллелограмма.

Тогда $Q \cdot dS_n = F_{\max} dS_1$ (без учета трения и КПД);

$$\text{т.е. } Q \cdot n \cdot l \cdot \sin \varphi_1 = F_1 \cdot \frac{l}{2} \sin \varphi_1; \text{отсюда}$$

$$F_{\max} = 2nQ. \quad (2)$$

Таким образом, привод по схеме рис.1 является линейным двойным умножителем как вертикальных перемещений, зависящих от длины l рычага, так и силовым умножителем, в зависимости от числа n секций антипараллелограммов.

В схеме на рисунке 2 силовой цилиндр расположен горизонтально между шарниром A и C 1-ой нижней секции, поэтому:

$$s_1 = l(\cos \varphi_0 - \cos \varphi_1)$$

где φ_0 – начальный угол положения рычага 1.

Максимальная сила будет в нижнем крайнем положении при $\varphi_1 \approx \varphi_0$.

$$F_{\max} = \frac{Qn \sin \varphi_1}{\cos \varphi_0 - \cos \varphi_1}. \quad (3)$$

Зависимость F_{\max} от обобщенной координаты φ_1 получается нелинейной, что приводит к резкому возрастанию силы при малых φ_1 (при $\varphi_1 \rightarrow 0, F_{\max} \rightarrow \infty$).

Коэффициент K_F возрастания максимальной силы F_{\max} рассчитывается для данного случая в малом диапазоне $\Delta\varphi = 1^\circ$ изменения угла $\varphi_1 = \varphi_0 + \Delta\varphi$ по следующей формуле:

$$K_F = \frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_0 - \cos(\varphi_0 + 1^\circ)}. \quad (4)$$

Результаты расчётов коэффициента K_F в зависимости от начального угла φ_0 , который следует принимать не менее 1° , представлен в таблице 1.

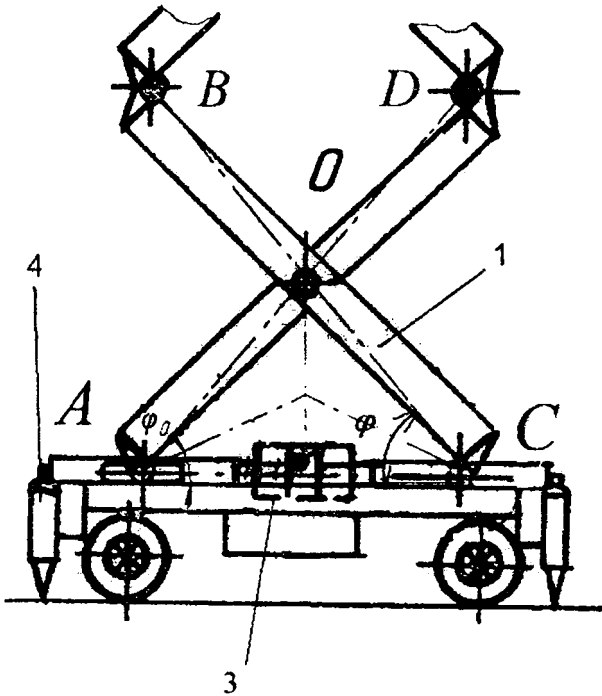


Рис. 2. Схема ножничного механизма с горизонтальным расположением привода

Таблица 1 – Значения коэффициента K_F в зависимости от начального угла φ_0

φ_0	0°	1°	3°	5°	7°	9°	14°	19°	29°	44°	60°
K_F	114,6	76,4	65,5	65,3	65,1	60,3	59,2	58,7	58,2	57,8	57,6

Как следует из таблицы 1 коэффициент возрастания максимальной силы K_F , с увеличением угла φ_0 от 0° до 45°, монотонно уменьшается от максимального значения $K_F = 114,6$ до минимальной величины $K_F = 57,6$ и при дальнейшем увеличении угла φ_0 коэффициент K_F становится примерно постоянным $\approx 57,5$.

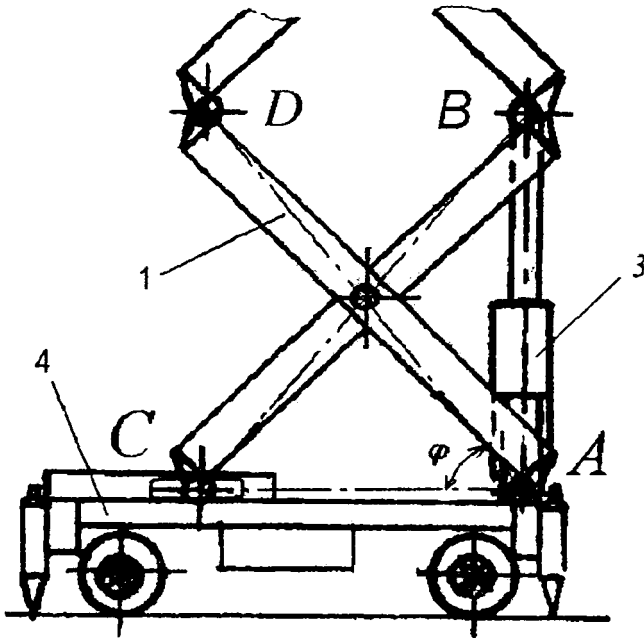


Рис. 3. Схема принимаемого ножничного механизма с боковым вертикальным приводом

В схеме на рисунке 3 сила F ведущего цилиндра приложена вертикально в точке B – крайней левой точке по линии AB . Тогда $ds_1 = l_1 \sin \varphi_1$ и из равенства элементарных работ получим:

$$F_{\max} = Qn \quad (5)$$

Следовательно, привод по схеме на рисунке 3 является также линейным одинарным умножителем, увеличивая как перемещение, так и максимальную силу F_{\max} в n раз по числу секций антипараллелограммов.

Таким образом, из приведенных схем привод на рисунке 3 обеспечивает наименьшую силу F_{\max} ведущего цилиндра при заданной вертикальной нагрузке Q .

ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов Э.И., Гарах В.А., Макаров А.Д. Моделирование динамики подъема площадки ножничного подъемника // Теоретическая и прикладная механика. – 2009. – Вып.24, с. 313 – 317.
2. Астахов Э.И., Гарах В.А. Особенности структуры и кинематики рычажного механизма ножничного подъемника // Машиностроение: Респ. сб. научн. трудов. Вып. 25. Мн.: БНТУ, 2009. – С. 24 – 27.
3. Гарах В.А., Астахов Э.И. Определение реакций и анализ нагруженности рычажного механизма ножничного подъемника // Машиностроение: Респ. сб. научн. трудов. Вып. 25. Мн.: БНТУ, 2009. – С. 21 – 24.

ОСОБЕННОСТИ ПРЕПОДАВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН СТУДЕНТАМ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Производство в экономике подавляющего большинства стран является базовым звеном и основой существования любого общества независимо от вида собственности. Технология и экономика – это неотъемлемые составляющие единого механизма воспроизводства условий существования общества, а технологическое развитие производства – база для экономического роста общества.

Новые социально-экономические условия требуют от различных сфер материального и нематериального производства повышения эффективности их деятельности на основе достижений научно-технического прогресса, эффективных форм управления. Выполнить эту сложную работу на высоком уровне можно только после тщательного изучения процесса производства. Только осведомленный в определенной отрасли специалист (коммерсант, экономист, товаровед) может объективно оценить результаты производства, дать полезные рекомендации по их улучшению.

Специалист должен иметь широкий кругозор, понимать научные принципы технологических процессов, основные технико-экономические особенности работы оборудования и факторы, влияющие на ход процесса; уметь анализировать и выявлять резервы повышения интенсивности процессов с целью снижения расходных норм и себестоимости продукции. Хорошим специалистом в экономике отрасли или маркетинге может стать выпускник технической специальности, освоивший основные технологии на производстве прошедший переподготовку по экономической специальности или маркетингу в определенной отрасли. Но данная подготовка специалиста требует определенных временных и финансовых затрат.

За последнее десятилетие в сфере образования произошел определенный количественный переход в сторону увеличения специальностей с экономическим и управленческим уклоном. Зачастую будущие специалисты не знают, в какой отрасли им придется работать. Поэтому для подготовки таких специалистов необходимо преподнести материал так, чтобы он был на их уровне восприятия. Например, неприемлемо засыпать специфическими техническими терминами аудиторию, которая к этому не подготовлена. Для того, чтобы студенты в процессе обучения, не были перегружены специфической технической информацией они получают общие представления о производственных процессах в различных отраслях промышленности.

Во время обучения студенты воспринимают информацию из различных источников:

- Лекции;
- Лабораторные или практические занятия;
- Самостоятельная работа и др.

Среди вышеперечисленных методов подачи материала важное место занимает вузовская лекция. Лекция выступает в качестве ведущего звена всего курса обучения и представляет собой способ изложения объемного теоретического материала, обеспечивающий целостность и законченность его восприятия студентами. Лекция должна давать систематизированные основы научных знаний по дисциплине, раскрывать состояние и перспективы развития соответствующей области науки и техники, концентрировать внимание обучающихся на наиболее сложных, узловых вопросах современного видения предмета изучения. Однако традиционная вузовская лекция имеет ряд недостатков, которые обусловлены следующим:

1. Лекция, как изложение материала творчески переработанного преподавателем, приводит к пассивному восприятию чужих мнений, и в некоторых моментах тормозит самостоятельное, индивидуальное мышление обучающихся.

2. Во время лекций студенты не внимают произносимым словам 40% времени

3. В первые 10 минут студент запоминает 70% информации, а в последние 10 минут – 20%

4. Через 4 месяца студенты только на 10% лучше знают дисциплину, чем другие, которым лекцию не читали.

5. На лекции одни слушатели успевают осмыслить, другие - только механически записать слова лектора.

Однако опыт обучения в высшей школе свидетельствует о том, что отказ от лекции снижает научный уровень подготовки обучающихся, нарушает системность и равномерность их работы в течение семестра. Поэтому лекция по-прежнему остается как ведущим методом обучения, так и ведущей формой организации учебного процесса в вузе. Указанные недостатки в значительной степени могут быть преодолены правильной методикой и рациональным построением изучаемого материала.

Таким образом, в условиях развивающегося содержания обучения и образования форма проведения лекций может оставаться традиционной, но должна претерпевать определенные изменения, которые можно отнести к инновационным формам подачи материала.

В основе таких форм лекций лежат следующие принципы контекстного обучения:

- Принцип проблемности. Этот принцип предполагает представление учебного материала в виде проблемных ситуаций и вовлечение слушателей в совместный анализ и поиск решений. Проблемное содержание лекции должно передаваться в проблемной форме.

- Принцип игровой деятельности. Для активизации слушателей целесообразно использовать игровую деятельность с помощью игровых процедур: разыгрывание ролей, мозговой атаки, брифингов и т.д. Применение их в начале лекции способствует снятию эмоционального напряжения, созданию творческой атмосферы и формированию познавательной мотивации.

- Принцип диалогического общения. Активизация лекции предполагает использование определенных методических приемов включения слушателей в диалогическое общение, протекающее в виде внешнего и внутреннего диалога.

- Принцип совместной коллективной деятельности. Проведение небольших дискуссий по ходу лекции при анализе и решении проблемных ситуаций позволяет создать активную, творческую и эмоционально положительную атмосферу. При этом создаются условия возникновения самоорганизации коллективной деятельности обучающихся и т.д.

К видам «нетрадиционных» лекций можно отнести следующие:

Проблемная лекция. Суть проблемной лекции заключается в том, что преподаватель в начале и по ходу изложения учебного материала создает проблемные ситуации и вовлекает слушателей в их анализ. Разрешая противоречия, заложенные в проблемных ситуациях, учащиеся самостоятельно могут прийти к тем выводам, которые преподаватель должен сообщить в качестве новых знаний. При этом преподаватель, используя определенные методические приемы включения слушателей в общение, как бы вынуждает, «подталкивает» их к поиску правильного решения проблемы. На проблемной лекции студент находится в социально активной позиции, особенно когда она идет в форме живого диалога. Он высказывает свою позицию, задает вопросы, находит ответы и представляет их на суд всей аудитории. Когда аудитория привыкает работать в диалогических позициях, усилия педагога окупаются сторицей – начинается совместное творчество. Если традиционная лекция не позволяет установить сразу наличие обратной связи между аудиторией и педагогом, то диалогические формы взаимодействия со слушателями позволяют контролировать такую связь.

Лекция с запланированными ошибками (лекция-провокация). На такой лекции особое место занимает умение слушателей оперативно анализировать информацию, ориентироваться в ней и оценивать ее. После объявления темы лекции неожиданно для слушателей преподаватель сообщает, что в ней будет сделано определенное количество ошибок различного типа: содержательные, методические, поведенческие и т.д. При этом преподаватель должен иметь перечень этих ошибок на бумаге, который он по просьбе слушателей обязан предъявить в конце лекции. Только в этом случае обеспечивается полное доверие аудитории к преподавателю. Лекцию-провокацию лучше всего проводить в аудитории с одинаковым уровнем подготовки студентов по изучаемой теме. Среднее количество ошибок на 1,5 часа лекции - 7-9. Слушатели в конце лекции должны назвать ошибки, вместе с преподавателем или самостоятельно дать правильные версии решения проблем. Для этого преподаватель оставляет 10-15 минут (время зависит от общей продолжительности лекции и сложности темы). Исходная ситуация создает

условия, как бы вынуждающие слушателей к активности: надо не просто воспринимать информацию, чтобы запомнить, а воспринимать, чтобы проанализировать и оценить. Немаловажен и личностный момент: интересно найти у преподавателя ошибку и одновременно проверить себя: могу ли я это сделать? Все это создает мотив, активизирующий психическую деятельность слушателя. После вводной информации преподаватель читает лекцию на объявленную тему. Вполне возможно, что в конце, когда проводится анализ ошибок, слушатели найдут их больше, чем было запланировано. Преподаватель должен это честно признать (а подтверждением будет перечень ошибок). Однако искусство преподавателя заключается в том, что он и эти незапланированные ошибки использует для реализации целей обучения. Поведение слушателей характеризуется двуплановостью: с одной стороны, восприятие и осмысление учебной информации, а с другой - своеобразная "игра" с преподавателем.

Лекция-визуализация. Ее применение связано, с одной стороны, с реализацией принципа проблемности, а с другой - с развитием принципа наглядности. В лекции-визуализации передача аудиоинформации сопровождается показом различных рисунков, структурно-логических схем, опорных конспектов, диаграмм, педагогического гротеска с помощью ТСО и ЭВМ (слайды, диафильмы, видеозапись, кодопозитивы, дисплеи, кинофильмы и т.д.). Такая наглядность компенсирует недостаточную зрелищность учебного процесса. Основной акцент в этой лекции делается на более активном включении в процесс мышления зрительных образов, то есть развития визуального мышления. Опора на визуальное мышление может существенно повысить эффективность предъявления, восприятия, понимания и усвоения информации, ее превращения в знания.

Методика чтения подобной лекции предполагает предварительную подготовку визуальных материалов в соответствии с ее содержанием. В этой работе должны участвовать преподаватели и обучающиеся, поставленные в положение не только воспринимающих, но и "создающих информацию". С этой целью преподаватель дает задание слушателям подготовить наглядные материалы по прочитанной лекции, определив их количество и способы представления информации.

Анализ использования лекции-визуализации позволяет сделать следующие выводы:

- Подобная лекция создает своеобразную опору для мышления, развивает навыки наглядного моделирования, что является способом повышения не только интеллектуального, но и профессионального потенциала обучаемых.
- Выбор способов достижения и типов наглядности зависит от темы. Руководствуясь принципом посильной трудности, при изложении сложных для восприятия и понимания тем, содержащих большой объем концентрированной информации, целесообразно использовать сочетание изобразительной и символической наглядности.
- Основная сложность состоит в выборе средств наглядности, их создании и режиссуре всей лекции в целом. Большую роль здесь играют такие факторы как графический дизайн, цвет, оптимальность сочетания словесной и визуальной информации, технических средств и традиционных наглядных материалов, дозировка в подаче информации, мастерство и стиль общения лектора с аудиторией.
- Применение лекции этого типа должно основываться на учете психофизиологических возможностей слушателей, их уровня образования и профессиональной принадлежности, что позволит предотвратить негативные последствия чрезмерной перегрузки зрительного канала восприятия.
- Данный тип подачи материала наиболее приемлем для обучения студентов экономических специальностей техническим дисциплинам, так как вместо непонятных для аудитории терминов они получают наглядное изображение или видео материал того или иного механизма или процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Я. Виленский, П.И. Образцов, А.И. Уман. Технологии профессионально-ориентированного обучения в высшей школе: Учебное пособие. Издание второе / Под ред. В.А. Сластенина. – М. : Педагогическое общество России, 2005. – 192 с. 2. Беспалько, В.П. Слагаемые педагогической технологии [Текст] / В.П. Беспалько – М.: Педагогика, 1989. – 192 с. 3. Е.Ю. Игнатова. Технологии профессионально – ориентированного обучения: Учебно-

методическое пособие /Под науч. ред. О.С.Орлова.- Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2002. - 68 с. 4. Л.Г. Семушина, Н.Г. Ярошенко. Содержание и технологии обучения в средних специальных учебных заведениях: Учеб. Пособие для преп. учреждений сред. проф. образования. – М.: Мастерство, 2001. – 272 с. 5. Образцов, П.И. Информационно-технологическое обеспечение учебного процесса в вузе [Текст] / П.И. Образцов // Высшее образование в России. – 2001. – № 6. – С. 46–50. 6. Педагогика: Учебное пособие [Текст] / Под ред. В.А. Сластенина, И.Ф. Исаева, А.И. Мищенко, Е.Н. Шиянова. – М.: Школа-Пресс, 1997. – 512 с. 7. Сластенин, В.А. О современных подходах к подготовке педагога [Текст] / В.А. Сластенин, Н.Г. Руденко // Педагогика. – 1999. – № 6. – С.55–62. 8. Талызина, Н.Ф. Технология обучения и ее место в педагогическом процессе [Текст] / Н.Ф. Талызина // Современная высшая школа. – 1977. – № 1. – С. 21. 9. Морозова А.В. Управление процессом профессиональной социализации студентов ссузов в условиях модернизации институтов образования. Монография [Текст] / А.В. Морозова, Н.А. Фролова – Орел: Изд-во ОРАГС, 2005. – 200 с. 10. Шагеева Ф., Иванов В. Современные образовательные технологии // Высшее образование в России, 2006, № 4. 11. Титаренко Л.Г. Мир ценностных ориентаций молодежи Белоруссии. //Ценностный мир современной молодежи: на пути к мировой интеграции. По материалам Международной научной конференции. М.:Социум, 1994. 6.

УДК 688.1.037.97+666.271

Сухоцкий А.А., Дворянчикова А.Б.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВЕРХНЕГО РАБОЧЕГО ДИСКА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОБРАБОТКИ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В предлагаемом [1] инструменте для пневмоцентробежной обработки шариков дополнительное усилие на обрабатываемую заготовку создается за счет профильного элемента, обеспечивающего возвратно-поступательное движение верхнего рабочего диска реализовано с помощью цилиндрического кулачкового механизма в виде кольца с профильным рабочим торцом и возвратно-поступательно движущимся элементом нагружения, в котором роль последнего выполняет верхний рабочий диск.

С целью достижения высокого качества изготавливаемых шариков, необходимо подобрать такой закон движения элемента нагружения $S(t)$, при котором не возникало бы грубых сколов на заготовках во время обработки. Отмеченное условие не позволяет выбрать $S(t)$ с жесткими или мягкими ударами. В таких случаях рекомендуется использовать синусоидальный закон движения элемента нагружения, при котором графики скоростей и ускорений не имеют точек разрыва, т. е. движение происходит без ударов.

Движение элемента нагружения разобьем на две фазы (подъема и возврата). Фазу дальнего стояния рекомендуется исключить для увеличения производительности инструмента. На фазе подъема, т.е. когда $0 \leq \varphi \leq \varphi_n$, зависимость для аналога ускорения следующая:

$$S'' = a_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot \varphi\right), \quad (1)$$

где a_n - ускорение подъема; φ_n - угол подъема; φ - угол, на который повернут кулачек.

Проинтегрировав выражение (1) дважды в пределах $0 \leq \varphi \leq \varphi_n$, получим соотношения для аналога скорости S' и перемещения S .

$$S' = \int S'' d\varphi + C_1 = \int a_n \sin\left(\frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot \varphi\right) d\varphi + C_1 = -a_n \frac{\varphi_n}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot \varphi\right) + C_1, \quad (2)$$

$$S = \int S' d\varphi + C_2 = \int \left(-a_n \frac{\varphi_n}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot \varphi\right) + C_1\right) d\varphi + C_2 = -a_n \frac{\varphi_n^2}{4\pi^2} \sin\left(\frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot \varphi\right) + C_1 \cdot \varphi + C_2. \quad (3)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 определяются из начальных условий, в соответствии с которыми при $\varphi = 0$ S' и $S'' = 0$.

Из зависимости (2) получаем: $C_1 = \frac{a_n \cdot \varphi_n}{2\pi}$. Одновременно из (3) имеем: $C_2 = 0$.

Подставив полученные выражения для C_1 и C_2 в равенства (2) и (3), получим:

$$S' = a_n \frac{\varphi_n}{2\pi} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot \varphi\right)\right), \quad (4)$$

$$S = a_n \frac{\varphi_n^2}{4\pi^2} \left(\frac{\varphi}{\varphi_n} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot \varphi\right)\right). \quad (5)$$

Амплитуда a_n аналога ускорения определяется из равенства (5) на основании условия, по которому при $\varphi = \varphi_n$ перемещение $S = S_{\max}$.

Тогда

$$a_n = \frac{2\pi}{\varphi_n^2} S_{\max}. \quad (6)$$

Тогда зависимости (1) (4) и (5) окончательно получают следующий вид:

$$S = S_{\max} \left(\frac{\varphi}{\varphi_n} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot \varphi\right)\right); \quad (7)$$

$$S' = \frac{dS}{d\varphi} = S_{\max} \frac{1}{\varphi_n} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot \varphi\right)\right); \quad (8)$$

$$S'' = \frac{d^2S}{d\varphi^2} = S_{\max} \frac{2\pi}{\varphi_n^2} \sin\left(\frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot \varphi\right). \quad (9)$$

Из равенств (8) и (9) следует, что аналоги скорости S' и ускорения S'' зависят не только от выбранного подъема S_{\max} выходного звена, но и от фазового угла φ_n . Аналог скорости S' обратно пропорционален углу φ_n , а аналог ускорения - φ_n^2 .

На фазе возврата, т.е. когда $(\varphi_n + \varphi_{dc}) \leq \varphi \leq (\varphi_n + \varphi_{dc} + \varphi_s)$, зависимость для аналога ускорения следующая:

$$S'' = \frac{d^2S}{d\varphi^2} = S_{\max} \frac{2\pi}{\varphi_s^2} \sin\left(\frac{2\pi}{\varphi_s} \cdot (\varphi - \varphi_n - \varphi_{dc})\right). \quad (10)$$

Интегрируя дважды (10) в пределах $(\varphi_n + \varphi_{dc}) \leq \varphi \leq (\varphi_n + \varphi_{dc} + \varphi_s)$, аналогично получаем выражения для аналога скорости S' и перемещения S в виде:

$$S = S_{\max} \left(\frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi}{\varphi_s} \cdot (\varphi - \varphi_n - \varphi_{dc}) \right) + \frac{\varphi_n + \varphi_{dc} + \varphi_s - \varphi}{\varphi_s} \right); \quad (11)$$

$$S' = \frac{dS}{d\varphi} = S_{\max} \frac{1}{\varphi_s} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{\varphi_s} \cdot (\varphi - \varphi_n - \varphi_{dc}) \right) - 1 \right); \quad (12)$$

Из равенств (10) и (11) следует, что аналоги скорости S' и ускорения S'' зависят не только от выбранного подъема S_{\max} выходного звена, но и от фазового угла φ_s , причем аналог скорости S' обратно пропорционален углу φ_s , а аналог ускорения $- \varphi_s^2$.

Для расчета угла давления ν предлагается рассматриваемый механизм свести к кулачковому с поступательно движущимся кулачком и толкателем путем развертывания цилиндрической поверхности кольца на плоскость. Тогда величину перемещения эквивалентного кулачка можно записать в виде

$$L = \varphi \cdot R_{cp}, \quad (13)$$

где φ — угол поворота цилиндрического кулачка;

R_{cp} — средний радиус рабочего профиля цилиндра

Выражение (13) в дифференциальной форме будет иметь вид

$$\frac{dS}{dL} = \frac{1}{R_{cp}} \frac{dS}{d\varphi}, \quad (14)$$

$$\frac{d^2S}{dL^2} = \frac{1}{L'(\varphi)} \left[L'(\varphi) \frac{d^2S}{d\varphi^2} - L''(\varphi) \frac{dS}{d\varphi} \right] = \frac{1}{R_{cp}^2} \frac{d^2S}{d\varphi^2}. \quad (15)$$

Отсюда следует, что

$$tg \nu = \frac{1}{R_{cp}} S'. \quad (16)$$

Зададимся максимально допустимым углом давления ν_{\max} для рассматриваемого механизма. Тогда, используя уравнение (16), получим условие выбора среднего радиуса рабочего профиля цилиндра:

$$R_{cp} \geq \frac{1}{tg \nu_{\max}} |S'|_{\max}, \quad (17)$$

где $|S'|_{\max}$ — наибольшее по абсолютной величине значение производной функции положения на интервале удаления при силовом замыкании.

Чтобы подрез практического профиля оказался невозможным, радиус ролика $R_{рол}$ должен удовлетворять условию

$$R_{рол} < \rho_{\min}, \quad (18)$$

где ρ_{\min} — минимальный радиус кривизны выпуклой части центрального профиля кулачка.

На практике $R_{пол}$ рекомендуется принимать $R_{пол} = (0.65 \div 0.8)\rho_{мин}$.

Радиус кривизны центрального профиля кулачка можно рассчитать по формуле

$$\rho = \frac{\left[1 + \left(\frac{dS}{dL}\right)^2\right]^{3/2}}{\frac{d^2S}{dL^2}}. \quad (19)$$

Подставляя в равенство (19) выражения (14) и (15) получим

$$\rho = \frac{\left[1 + \frac{1}{R_{cp}^2} \left(\frac{dS}{d\varphi}\right)^2\right]^{3/2}}{\frac{1}{R_{cp}^2} \frac{d^2S}{d\varphi^2}} = \frac{R_{cp}^2 \cdot \left[1 + \frac{1}{R_{cp}^2} \left(\frac{dS}{d\varphi}\right)^2\right]^{3/2}}{\frac{d^2S}{d\varphi^2}}. \quad (20)$$

Для исследования на экстремум выражение (20) следовало бы продифференцировать по φ и производную приравнять к нулю. Однако полученное в результате уравнение трудно разрешимо относительно φ . Поэтому для нахождения $\rho_{мин}$ целесообразнее вычислить ряд последовательных значений ρ и определить наименьшее.

Для получения точных координат x_b и y_b действительного профиля кулачка воспользуемся готовыми формулами из [2]

$$\begin{cases} x_b = S + \frac{r \cdot dS/dL}{\sqrt{1 + (dS/dL)^2}}; \\ y_b = S - \frac{r}{\sqrt{1 + (dS/dL)^2}}, \end{cases} \quad (21)$$

где r – радиус ролика. С учетом (14) имеем

$$\begin{cases} x_b = S + \frac{r \cdot dS/d\varphi}{R_{cp} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{R_{cp}^2} \left(\frac{dS}{d\varphi}\right)^2}}; \\ y_b = S - \frac{r}{\sqrt{1 + \frac{1}{R_{cp}^2} \left(\frac{dS}{d\varphi}\right)^2}}. \end{cases} \quad (22)$$

Полученные по (22) координаты x_b и y_b в дальнейшем должны использоваться в процессе изготовления профильного торца кольца в инструменте для пневмоцентробежной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТИН, 2000, №7, Усовершенствованный инструмент для пневмоцентробежной обработки шариков / Филонов И.П., Козерук А.С., Филонова М.И., Сухоцкий А.А. 2. Теория механизмов и машин. Проектирование. Под ред. О. И. Кульбачного. Учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов. – М.: Высш. шк., 1970. –288 с.: ил.

ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОСТИ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Выбор основных направлений обновления образования в современных условиях соотносится с направлениями структурных преобразований машиностроительного комплекса, приведенными в Концепции Национальной стратегии и устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2010 года: опережающее развитие приоритетных, экспортоориентированных и импортозамещающих производств на основе эффективного использования имеющегося научно-производственного потенциала, его модернизации и реструктуризации [1, с.2].

Поэтому в новых социально-экономических условиях меняются требования к личностным и деловым качествам специалистов: навыки труда сохраняют свое значение, но все больше на первый план выходят фундаментальные знания, умения анализировать, оценивать нестандартные ситуации и принимать решения. В качестве основных требований к работнику выступают: умения сотрудничать с людьми, быть корпоративными, контролировать свои эмоциональные реакции. Необходимым становится высокий уровень самостоятельности и самоуправления в сочетании с навыками контроля непосредственного процесса труда, ответственности за планирование, организацию и оценивание его результатов, а также дисциплинированность, необходимая для обеспечения безопасности и надежности производственных процессов. Все сказанное в максимальной степени относится к высшему техническому образованию, так как в характере и содержании производственной деятельности инженеров произошли объективные изменения.

Сложность профессиональных задач, стоящих перед будущими инженерами машиностроительного производства, а именно: развитие инновационного потенциала машиностроительной отрасли, освоение прогрессивных машиностроительных технологий, повышение технического уровня и качества машиностроительной продукции, которые обеспечат отечественным предприятиям конкурентные преимущества на мировом рынке; разработка и промышленное освоение экологически чистых материалов, отвечающим мировым стандартам качества продукции; создание тракторов, автомобилей и другой техники, посредством которой реализуются современные прогрессивные ресурсосберегающие технологии - предполагает от выпускников вуза наряду с высокой производственной квалификацией хорошую теоретическую подготовку, сформированность специфических качеств и постоянное повышение уровня образования. Выполнить эти задачи могут именно инициативные, самостоятельные, творчески мыслящие специалисты.

Таким образом, важнейшей задачей системы высшего профессионального образования на современном этапе является подготовка личности к профессиональной деятельности в условиях неопределенности, риска, высокой динамики экономических и социокультурных трансформаций. Современный специалист в любой сфере деятельности должен быть готов к творческому решению нестандартных профессиональных задач, к самостоятельному поиску и приобретению новых знаний, овладению новыми видами деятельности, самостоятельному принятию технических и управленческих решений, самостоятельному получению необходимых знаний. Такая ориентация профессионального образования предполагает целостное развитие личности студента, в том числе развитие его профессиональной самостоятельности как интегративного качества личности специалиста.

Энциклопедия профессионального образования [2, с.391], определяет профессиональную самостоятельность как критерий – показатель профессионального мастерства, формируемого у учащихся в процессе производственного обучения, выражается в умении самостоятельно разбираться во всех требованиях, предъявляемых к работе, планировать трудовой процесс,

самостоятельно выполнять порученное задание, контролировать ход и результаты своего труда, предупреждать и устранять неполадки. Она проявляется также в умении самостоятельно преодолевать встречающиеся в процессе работы трудности, добиваться высокого качества продукции, высокой производительности труда, экономного расходования материалов и энергии, образцового состояния оборудования. Высшим проявлением профессиональной самостоятельности являются производственная инициатива и творчество, новаторский подход к делу.

Проблема формирования профессиональной самостоятельности, раскрытие существенных характеристик понятия и его структура научную разработку впервые получила в работах посвященных подготовке рабочих в системе профессионально-технического образования. Различным аспектам формирования профессиональной самостоятельности у учащихся профессиональных технических училищ посвящены исследования Г.И. Ажикина [3], М.Н. Дудиной [4], В.Е. Земцова [5] и др.

В исследовании Г.М. Романцева дается многоаспектность трактовки феноменологии профессиональной самостоятельности. Он рассматривает ее как интегративное качество личности, проявляющееся в производственной деятельности и характеризующееся определенной системой знаний, умений и навыков, сознательностью и мотивированностью действий, инициативностью и творческим подходом к делу, проявлением своей воли, опирающейся на понимание необходимости действовать в соответствии с интересами трудового коллектива, правильностью и быстротой решения проблемных ситуаций в процессе работы и общественной деятельности, направленностью на повышение производительности труда и качества его результатов, на активное участие в решении социально-экономических проблем [6, с.215.].

Анализ существующих определений понятия «профессиональная самостоятельность» позволил выделить следующие существенные признаки качества: интегративности; квалификации; рефлексии; личного стиля деятельности; сознательности; мотивированности; инициативности и творчества.

Проведенное исследование сотрудниками инженерно-педагогического факультета Белорусского национального технического университета в рамках ГКПНИ «Экономика и общество», номер госрегистрации 20062619 (всего было опрошено 4269 студентов) показало, что основными доминантными профессиональными качествами современного инженера являются: широкие профессиональные знания по избранной специальности (так считает 72,2% от числа ответивших респондентов), умение общаться и работать с людьми (65,0 %), иметь практические трудовые навыки в профессиональной деятельности (64,3%), глубокие знания по избранной специальности (47,5%), самостоятельное оригинальное мышление (45,7%), умение отстаивать свои позиции и убеждения (33,1%), владение современными методами управления (32,7%); личностными – дисциплинированность (30,8%), уверенность (29,0%), инициативность (28,3%), самостоятельность (27,6%), настойчивость (26,7%), добросовестность (24,2%), трудолюбие (22,1%) и др.

Как отмечено в исследованиях И.О. Мартынюка [Мартынюк, И.О. Инженер в зеркале времени / И.О. Мартынюк - Киев, 1989. - 157 с., с. 89], характерными для инженера – новатора явились следующие качества (в порядке значимости): 1) творческий подход к делу; 2) самостоятельность; 3) знания; 4) интеллектуальные способности; 5) оперативность; 6) работоспособность; 7) ответственность; 8) опыт; 9) настойчивость. Таким образом, самостоятельность является одним из доминирующих качеств личности современного инженера.

В совокупности перечисленные характеристики и требования к подготовке инженера в контексте современного развития теории и практики высшего профессионального образования определяют необходимость решения проблемы формирования профессиональной самостоятельности у будущего специалиста.

Для изучения состояния проблемы формирования профессиональной самостоятельности на практике автором исследования проанализированы затруднения начинающих и будущих инженеров в области профессиональной деятельности.

В исследовании принимало участие 230 человек: студенты 4-5 курсов Белорусского национального технического университета, обучающиеся на технических специальностях; молодые выпускники высших технических учебных заведений, в настоящее время осуществляющих свою профессиональную деятельность на различных промышленных предприятиях г. Минска и Минской области; руководители среднего и высшего звена промышленных предприятий г. Минска и Минской области (Минский автомобильный завод, Минский моторный завод, Минский тракторный завод и т.д.) .

На вопрос «Довольны ли Вы подготовкой выпускников технических вузов к профессиональной деятельности?» большинство руководителей предприятий ответили утвердительно – 53,7%, однако 12,2% респондентов ответили «нет», а 34,1% опрошенных вообще затруднились дать однозначный ответ.

На аналогичный вопрос выпускники, работающие на промышленных предприятиях, отметили, что только 33,3% довольны своей подготовкой, 16,7% респондентов не довольны, а 50% затруднились дать однозначный ответ.

Так же были выявлены трудности, с которыми выпускники вузов непосредственно сталкиваются в процессе самостоятельной квазипрофессиональной или трудовой деятельности в различных группах респондентов.

Они распределились следующим образом: более половины респондентов (52,2%), отмечают, что не владеют в полном объеме навыками по профессии, вместе с тем 32,6% опрошенных отмечают недостаточный объем знаний; 49,1% респондентов отмечают, что с трудом принимают самостоятельное решение; 26,5 % респондентов отмечают нехватку времени при выполнении задания, а 26,1% испытуемых отмечают низкий уровень усвоения методов рациональной организации труда; 20,9 % респондентов отмечают у себя нехватку силы воли и усидчивости. Так же более трети респондентов отмечают отсутствие привычки работать самостоятельно – 34,8%. Умение работать в команде респонденты оценили достаточно высоко (5,7%).

При выявлении точки зрения респондентов на актуальность проблемы формирования профессиональной самостоятельности из предлагаемых в анкетах 1 и 2 профессиональных качеств, необходимых современному инженеру респонденты выбрали следующие (в порядке значимости): 1) глубокие профессиональные знания (средний балл 9,0); 2) способность находить и принимать обоснованные решения (средний балл 8,9); 3) способность принимать ответственные решения в различных производственных ситуациях и профессиональная самостоятельность (средний балл 8,7); 4) умение ориентироваться в современном производстве и науки и профессиональная активность и деловитость (средний балл 8,5); 5) способность самостоятельно планировать и осуществлять работу (средний балл 8,3); 6) настойчивость, упорство и решительность (средний балл 7,9); 7) инициативность (средний балл 7,7).

Данные эксперимента подтвердили потребность работодателей в специалистах со сформированной профессиональной самостоятельностью, так 78,1% отметили необходимость формирования качества в ВУЗе, 14,6% ответили, что в этом нет необходимости, 7,3% затруднились ответить. При этом только 12,2% респондентов отметили, что образовательная система вуза полностью формирует профессиональную самостоятельность, 65,9% отметили, что данное качество формируется частично, 2,4% указали на то, что профессиональная самостоятельность не формируется в ВУЗе, а 19,5% работодателей затруднились ответить. Профессиональной самостоятельностью при этом обладают только 29,3% выпускников технического ВУЗа, не обладают – 34,1%, остальные респонденты затруднились оценить данное качество (36,6%).

Указанные факторы позволяют сделать вывод, что выпускники имеют недостаточную подготовленность к профессиональной деятельности, так как изменившиеся условия труда, требуют от них качеств (а не умений и знаний), которые в вузе не формируются.

Анкетирование выявило, что большинство выпускников (66,7%) и студентов (61,2%) также выразило мнение о необходимости формирования профессиональной самостоятельности в ВУЗе.

На основе проведенных бесед, анкетирования и наблюдений было отмечено, что профессиональной самостоятельностью обладают 27,3% студентов и 33,3% выпускников технических ВУЗов.

Полученные данные свидетельствуют о том, что образовательная система вуза не полностью формирует профессиональную самостоятельность будущих инженеров. 20,4% респондентов отмечают, что образовательная система ВУЗа формирует профессиональную самостоятельность, 59,6 % – формирует частично, 12,7% – не формирует и 7,3% затруднились с ответом.

На открытые вопросы были получены неполные варианты ответов, которые содержали недостаточное количество сущностных характеристик ключевого понятия. На вопрос «Как Вы понимаете термин «профессиональная самостоятельность инженера» получены следующие ответы: «способность принимать ответственные решения» – 83%, «глубокие профессиональные знания» – 34 %; «способность планировать, выполнять и контролировать работу» – 9%; «твор-

ческий подход к решению профессиональной задачи» –7%; «инициативность, активность, деловитость»–5%, «способность повышать профессиональный уровень»–2%.

Позитивным является то, что 64,2% респондентов положительно относятся к перспективе овладения профессиональной самостоятельностью, 16,2 % дали отрицательный ответ, и 19,6% затруднились ответить.

Компоненты профессиональной самостоятельности изучались нами на основе вопросов анкеты, где молодым специалистам и студентам предлагалось выбрать один из трех предложенных вариантов. Результаты исследования мотивационного компонента показали, что 45,7 % респондентов самостоятельно выбрали свою профессию, при этом 54,1 % отмечают положительное отношение к своей профессии. 57,7% опрошенных нравилось или нравится учиться в вузе, а 58,9% студентов и выпускников с интересом изучали дисциплины общепрофессионального и профессионального циклов. При этом 58,1% респондентов интересует процесс выполнения задания на занятиях по данным дисциплинам, они отмечают их влияние на формирование профессиональной самостоятельности.

При возникновении трудностей в процессе выполнения задания настойчивость как проявление мотивационного компонента обнаруживают 20,6% студентов и выпускников, 32,4% пытаются выполнять задание, но без особого энтузиазма, 47,0% респондентов стараются получить совет педагога или руководителя. Анкетирование также показало, что преобладающими мотивами выполнения задания является познавательный интерес (55,9%) и стремление выполнять требования преподавателя (60,1%).

Однако при решении профессиональных или квазипрофессиональных задач только 20,6% респондентов настойчиво добиваются результатов работы.

Результаты исследования содержательно-операционного компонента изучались на основе вопросов анкеты, а также в процессе практической деятельности студентов на занятиях по дисциплине «Технологическая оснастка». В результате деятельности цель работы задается преподавателем. Обучаемый должен эту цель принять, осознать и наметить пути ее реализации. Эти условия учебной и квазипрофессиональной деятельности студентов в процессе обучения отвечают требованиям, предъявляемым к инженерам на производстве. Комплекс целей и задач деятельности известен будущему инженеру. Чуть менее половины студентов и выпускников (45,2%) осознает цель четко. 16,4 % респондентов цель осознает недостаточно четко, что приводит к неумению определять этапы выполнения задания. Более трети выпускников и студентов (33,4%) не обдумывают цель задания, что приводит к ошибочным результатам. Недостаточно продумывать общую цель, необходимо четко представить себе конечный и промежуточные результаты работы. Многие студенты считают, что цель работы не ясна, сразу же приступают к выполнению задания. Подобным образом поступают более половины респондентов (50,2 %). В итоге они часто допускают ошибки. Треть студентов (34,7%) продумывают цель работы, нечетко. Лишь 15,1% студентов сразу четко представляют конечный и промежуточные результаты работы, что ведет их к качественному достижению цели.

Представленные промежуточные результаты работы приводят студентов к составлению плана выполнения задания, что характеризует уровень сформированности ориентировочного компонента. Постоянно составляют план только 25,1 % опрошенных, 26,5% респондентов лишь иногда составляют план. Большинство (48,4%) работают без плана, что приводит их к ошибкам, постоянному обращению за помощью к преподавателю, коллегам или одноклассникам. Одним из важных условий самостоятельного эффективного выполнения задания является предварительный отбор и поиск справочной, информационной и другой литературы. Информационные источники выбирается на основании продуманного и четко составленного развернутого плана работы. В связи с тем, что малая часть студентов составляют план работы, то значительная их часть 59,8% подбирают информационные источники, когда приступают к выполнению очередного этапа работы. Это приводит к потере времени на поиск, сбоям темпа работы. Только 13,2 % респондентов готовят необходимые информационные источники перед началом работы для всех ее этапов. При этом 55,3% опрошенных не следят за временем при выполнении задания. Чуть менее трети респондентов (25,6%) придерживаются строго отведенного времени, а 19,2% опрошенных рассчитывают время на выполнение задания самостоятельно. 40,8 % отмечают, что для осуществления профессиональной или квазипрофессиональной деятель-

ности им достаточно знаний о планировании, контроле и организации работы, 30,1%, считают, что данных знаний не совсем достаточно и 29,7 % , что не достаточно.

Анализ результатов самоконтроля студентов показал, что чуть менее половины респондентов (47,9%) не только не контролируют промежуточные результаты, но и не пытаются проверить конечный результат, а обращаются за этим к коллеге или педагогу. Надежда на подсказку и контроль преподавателя отрицательно сказывается на формировании регулятивного компонента профессиональной самостоятельности. Незначительная доля студентов (32,4%) самостоятельно проверяет конечный результат. Еще меньшее количество студентов (19,6%) самостоятельно контролирует каждый этап работы. Выражением самоконтроля служит и поддержание последовательности выполнения задания. Только 29,2% респондентов стараются поддержать порядок и последовательность выполнения задания, 57,5% не задумываются над этим, 13,3% - совсем не чувствуют влияния порядка и последовательности выполнения задания на процесс его эффективного выполнения. После достижения результата работы 34,7% студентов и выпускников сразу переходят к другой работе, не анализируя собственных ошибок, 43,4 % только оценивают результат, также не анализируя ошибок, 21,9% опрошенных проводят анализ ошибок. При этом только 20,6 % считают, что знаний, умений достаточно для работы в условиях предприятия.

Показателем уровня сформированности коммуникативного компонента служит оказание помощи одногруппнику, поскольку оказать квалифицированную помощь можно, лишь научившись самостоятельно решать профессиональные задачи. Как показал анализ анкет, 39,3 % студентов чаще всего обращаются за помощью к преподавателю, который помогает им исправить допущенные ошибки, 43,8 % респондентов предпочитают помощь коллег, 16,9% стараются исправить допущенные ошибки самостоятельно. При этом постоянно оказывают помощь одногруппникам только 31,1 % студентов и коллегам 22,2% молодых выпускников.

Результаты показывают, что наименее сформированными аспектами деятельности студентов, отражающими сущность профессиональной самостоятельности, являются планирование работы и самоконтроль процесса ее выполнения. С ними связаны слабо преодолеваемые затруднения студентов при выполнении профессиональных задач. Причины этого заключаются в отсутствии целенаправленного формирования преподавателем названных аспектов деятельности.

Анкетирование профессорско-преподавательского состава с целью выявления причин низкой сформированности профессиональной самостоятельности у студентов технического вуза подтверждает наш вывод. Преподавателям предлагалось проанализировать процесс обучения в ВУЗе с позиции его участников – педагога и студента. Респондентам было предложено проранжировать цели и результаты своей педагогической деятельности: формирование широких профессиональных знаний; формирование трудовых умений и навыков в профессиональной области; развитие творческого мышления студентов; формирование учебной активности; формирование нравственного поведения; формирование умений общаться с людьми; формирование активной гражданской позиции; формирование личностных качеств (дисциплинированности, самостоятельности, инициативности и т.д.).

Основной целью учебного процесса преподаватели видят формирование прочных знаний по предмету, умений и навыков студентов (100%); большое внимание уделяют задачам развития творческого мышления студентов – 54 %. Менее всего, оказывается, преподаватели ориентируются на личностное развитие студентов (всего 12%). В тоже время ожидание результативности педагогической деятельности носит личностно-направленный характер – большинство преподавателей (91%) желают видеть своих выпускников активными, инициативными, ответственными, самостоятельными.

Изучение практики профессиональной подготовки будущих инженеров в техническом вузе показало, что коллектив преподавателей по результатам дипломного проектирования и государственного экзамена положительно оценивает подготовленность выпускников к будущей профессиональной деятельности. В то же время процесс адаптации выпускников на предприятии затягивается, первые этапы профессиональной деятельности молодых инженеров недостаточно эффективны, недостаточно сформулированы профессиональные умения по некоторым видам профессиональной деятельности, выпускники слабо подготовлены к профессиональной деятельности.

Результаты анкетирования преподавателей подчеркивают проблемность организации учебного процесса по формированию профессиональной самостоятельности будущих инжене-

ров и объясняют серьезные упущения в работе по ее формированию. Именно по этой причине считаем, что преподаватели используют «инструментарий», ориентированный на формирование профессиональных знаний, умений и навыков без учета направления на их развитие.

В реальном учебном процессе в высшей профессиональной школе явно обнаруживаются противоречия: 1) между общественной потребностью в творческих, самостоятельно мыслящих инженерах, способных к решению сложных профессиональных задач, и действительностью, при которой в вузах происходит формирование специалистов с ограниченным объемом знаний, по шаблону выполняющих порученные задания; 2) между необходимостью профессиональной подготовки в вузах самостоятельных специалистов и отсутствием научно обоснованных рекомендаций по формированию профессиональной самостоятельности будущих специалистов.

Анализ современного состояния проблемы позволил в качестве основных требований, адресуемых высшей технической школе и определенным нами как социальный заказ общества, выделить следующее: подготовка конкурентноспособного и профессионально мобильного специалиста, умеющего оперативно и самостоятельно реагировать на постоянно возникающие изменения в процессе профессиональной деятельности; развитие способностей к самообразованию, их коррекция в течение будущей профессиональной деятельности; формирование нового типа инженера – свободной творческой личности, умеющей самостоятельно решать инновационные типы задач.

Таким образом, анализ теоретических и практических аспектов проблемы формирования профессиональной самостоятельности у будущих инженеров показал ее недостаточную разработанность, что актуализировало необходимость уточнения концептуальных оснований овладения студентами профессиональной самостоятельностью и разработке методике ее формирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2020 г. / Нац. комис. по устойчивому развитию Респ. Беларусь; редкол.: В.Н.Дражин [и др.]. – Минск : «Белорусский дом печати», 2003. – 112 с. Энциклопедия профессионального образования: в 3-х т./ Под. ред. С.Я. Батышева.- М.: АПО, 1999. – Т.2. - 440 с. 3. Ажикин, Г. И. Самостоятельная работа учащихся профтехучилищ в процессе производственного обучения / Г. И. Ажикин .- М.: Высш. шк., 1987. – 175 с. 4. Дудина, М.М. Методика формирования профессиональной самостоятельности учащихся ПТУ в процессе производственного обучения электросварщиков: автореф...дис. канд. пед. наук: 13.00.02 / М.М. Дудина; НИИ проф.-тех. Пед. АПП СССР. – Казань, 1990. – 18 с. 5. Земцов, В.Е. Формирование профессиональной самостоятельности учащихся средних профтехучилищ в процессе производственного обучения: автореф. дис. канд. пед. наук: 13.00.02 / В.Е. Земцов; НИИ проф.-тех. Пед. АПП СССР. – Казань, 1987. – 18 с. 6. Романцев, Г.М. Теоретические основы высшего профессионального образования / Г.М. Романцев. – Екатеринбург Урал. гос. проф. – пед. ун-т, 1997. - 332 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ; ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.9

Беляева Г.И., Беляев Г.Я., Кочергин А.И.

ВЛИЯНИЕ ХИМСОСТАВА И СТРУКТУРЫ НА ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ СТАЛЕЙ РЕЗАНИЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Исследованию обрабатываемости материалов посвящено большое количество работ. В большинстве своем они посвящены выявлению показателей (в том числе и косвенных) и методам определения обрабатываемости материалов. Значительно меньше работ представляют исследования по определению влияния физико-механических свойств чугунов и сталей на их обрабатываемость. В еще меньшем количестве работ оценивается влияние химсостава и отдельных структурных составляющих металлов на их обрабатываемость резанием. Необходимо отметить, что в большинстве работ устанавливаются только качественные связи между отдельными характеристиками обрабатываемого материала и обрабатываемостью резанием.

В наиболее фундаментальном исследовании [1] изложены основные подходы к проблеме обрабатываемости, приведены многие зависимости, характеризующие влияние некоторых физико-механических свойств, химического состава и микроструктуры обрабатываемого материала на его обрабатываемость резанием. В частности, отмечается, что наибольшее влияние на обрабатываемость сталей оказывает процентное содержание углерода в средне- и малоуглеродистых сталях. Известно, что при содержании углерода до 0,08%, очень сложно получить высокое качество обрабатываемой поверхности. При повышении содержания углерода свыше 0,3% в структуре сталей появляется цементит, обладающий сильным абразивным воздействием на режущий инструмент, что приводит к заметному ухудшению обрабатываемости. Авторами отмечается, что наиболее оптимальным с точки зрения обрабатываемости следует считать содержание углерода в пределах (0,2-0,3)%.

Наличие в небольших количествах марганца (<1,5%) упрочняет феррит, снижая пластичность высокопластичных сталей, что улучшает их обрабатываемость. При содержании марганца свыше 10% сталь под воздействием сил резания приобретает склонность к наклепу, резко возрастают прочностные характеристики, пластичность же снижается, по границам зерен образуются железомарганцовистые карбиды, аустенит же частично переходит в мартенсит. Обрабатываемость такого рода сталей очень плохая.

V, Mo, Cr, W в определенных пределах повышают прочность и вязкость сталей, что ухудшает их обрабатываемость.

При обработке жаропрочных и коррозионностойких сталей и сплавов наибольшее влияние на обрабатываемость оказывают алюминий и титан, [2]. Алюминий совместно с титаном образуют интерметаллические соединения, значительно упрочняющие сплавы и ухудшающие их обрабатываемость. Причем, обрабатываемость жаропрочных и коррозионностойких сталей зависит не только от процентного содержания в сплаве Al и Ti, но и от вида термообработки. При отпуске и отжиге выделяется большое количество интерметаллидов, которое приводит к упрочнению сплавов и снижению обрабатываемости. При закалке же часть интерметаллидов переходит в твердый раствор, что приводит к улучшению обрабатываемости.

Увеличение содержания Cr до 30% незначительно сказывается на обрабатываемости жаропрочных сталей. Содержание Mo до 2% в жаропрочных сталях мало сказывается на их обрабатываемости резанием. Вместе с тем, кремний значительно снижает обрабатываемость такого рода сталей.

Как отмечается в работе [3], наряду с перечисленными факторами на обрабатываемость сталей большое влияние оказывает и микроструктура.

Известно, что мягкие стали ферритного класса с содержанием в структуре до 20% перлита (П) обладают наилучшей обрабатываемостью. При большем содержании феррита (Ф) возможна хорошая обрабатываемость при условии некоторого снижения пластичности путем предварительной холодной обработки. С другой стороны, стали с повышенным содержанием П в структуре характеризуются более высоким сопротивлением деформации. Однако, в ряде случаев сопротивление резанию заметно не изменяется, т. к. некоторые динамические характеристики процесса резания улучшаются. Вместе с тем, стойкость инструмента снижается в связи с увеличением доли твердого цементита, [4]. Как видно, истирающая способность перлита зависит от формы находящегося в нем цементита. У пластинчатого перлита она больше, у зернистого – меньше. Причем, чем меньше зерно, тем лучше обрабатываемость.

В соответствии с данными работы [1], лучшей обрабатываемостью из всех структур обладает феррит, затем в порядке ухудшения обрабатываемости идут зернистый и пластинчатый перлит, сорбит и троостит. Авторами приводятся таблицы, отображающие влияние структуры стали на период стойкости режущего инструмента и шероховатость обработанной поверхности.

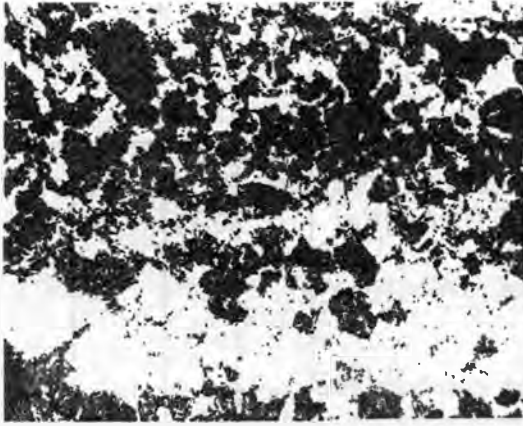
Авторами данной работы были проведены обширные исследования обрабатываемости сталей 20Х, ШХ15, ШХ15СГ, Р6М5, 9ХС, 35ХГСА, 38ХМЮА, У12, стали 45 и 20ХН3А в зависимости от химсостава, режимов термообработки, физико-механических свойств, параметров тонкой кристаллической структуры, градиента остаточного магнитного поля, амплитуды колебательных ускорений и процентного содержания структурных составляющих. Нашими исследованиями, проведенными в производственных условиях Минского автомобильного завода, установлено, что на обрабатываемость стали 20ХН3А большое влияние оказывает наличие в структуре бейнита (Б), о чем в технической литературе, кроме как в [5], не упоминается.

Были исследованы заготовки шестерен на 36 режимах термической обработки при различных способах охлаждения: вместе с печью, на спокойном воздухе и в струе воздушного потока. При этом были получены структуры бейнит+феррит (Б+Ф) при охлаждении на спокойном воздухе и в струе воздуха, феррит+перлит пластинчатый (Ф+П_{пл}) при охлаждении вместе с печью, бейнит +феррит +перлит пластинчатый (Б+Ф+П_{пл}) при охлаждении на спокойном воздухе (всего в двух случаях) и феррит+перлит пластинчатый+перлит зернистый 10% (Ф+П_{пл}+П_{зерн} 10%) при охлаждении вместе с печью, рисунок 1.

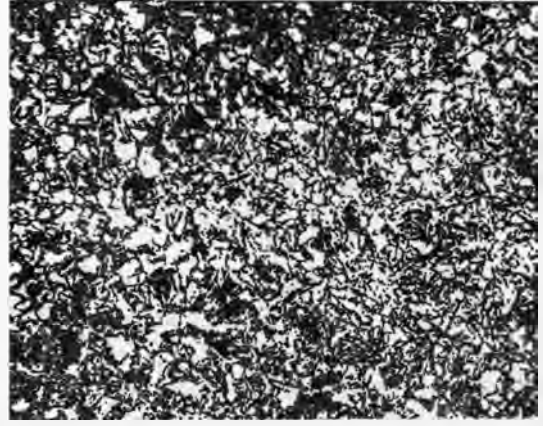
С помощью регрессионного анализа установлено, что самой плохой обрабатываемостью из всех полученных структур при скоростях резания, превышающих 60 м/мин, обладает бейнит+феррит, рисунки 2 и 3. Однако, как показали опыты, обрабатываемость сталей с такой структурой во многом зависит от режимов термообработки, в частности, от скорости охлаждения. Так, при обработке стали со структурой Б+Ф, образовавшейся при охлаждении на спокойном воздухе, средний износ по задней грани $h_{cp} = 0,18$ мм, а при обработке той же структуры, полученной при охлаждении в струе воздуха – $h_{cp} = 0,14$ мм.

Следует отметить, что обрабатываемость бейнитно-ферритной структуры во многом зависит и от скорости резания. Так, при точении образцов, охлажденных в струе воздуха, со скоростью $V=30$ м/мин средний износ $h_{cp} = 0,14$ мм и был самым малым из всех способов охлаждения. С увеличением скорости до $V=60$ м/мин и выше обрабатываемость структуры Б+Ф была наихудшей, $h_{cp} = 0,67$ мм.

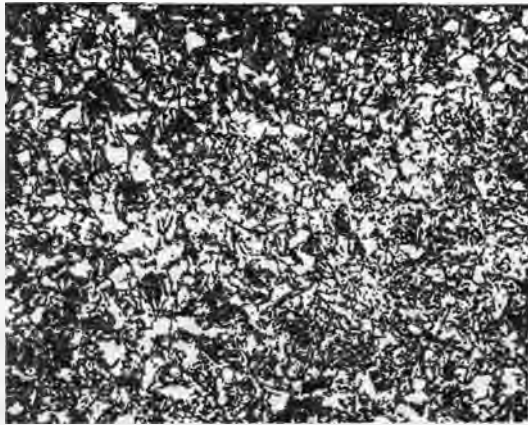
Японскими исследователями [5] было высказано предположение, что структура верхнего бейнита и феррита имеет сравнительно невысокую пластичность по сравнению со структурой Ф+П, поэтому достаточно хорошо обрабатывается резанием. Самой лучшей обрабатываемостью из перечисленных выше обладала структура Ф+П_{пл} + П_{зерн} 10%. Но она была зарегистрирована только в одном случае из 36 (5 образцов).



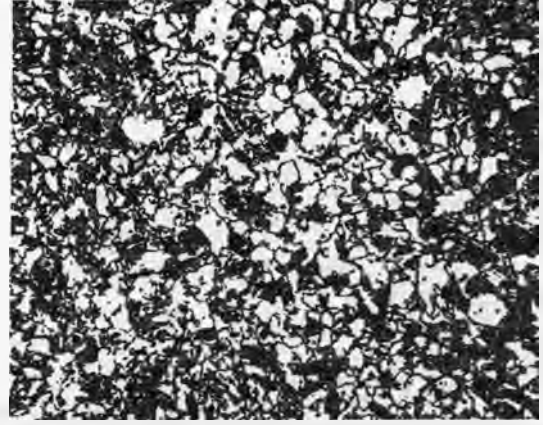
Ф+П_{ГЛ}+ П_{ЗЕРН}(10%), $t_{\text{выд}}=10$ ч, $T=840^{\circ}\text{C}$,
 $h_{\text{CP}}=0,08$ мм, $R_z=930$ Н, НВ=179, охлаждение
 с печью, $Ra=11,2$ мкм.



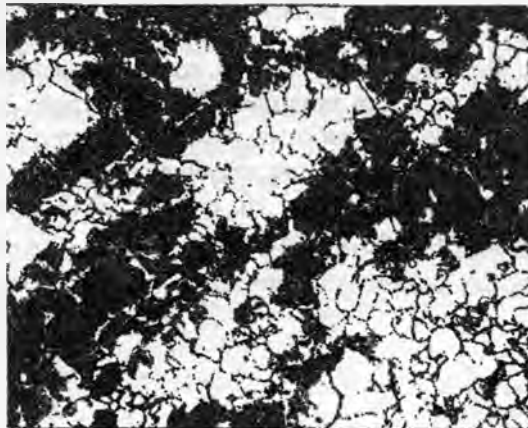
Б+Ф, $h_{\text{CP}}=1,19$ мм, $t_{\text{выд}}=10$ ч, $T=860^{\circ}\text{C}$,
 $R_z=1033$ Н
 НВ=255, охлаждение в струе воздуха,
 $V=60$ м/мин, $Ra=8,4$ мкм.



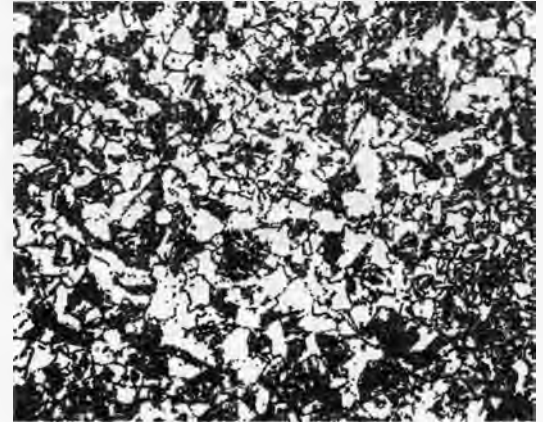
Б+Ф, $h_{\text{CP}}=1,19$ мм, $t_{\text{выд}}=10$ ч, $T=860^{\circ}\text{C}$,
 $R_z=1033$ Н
 НВ=255, охлаждение в струе воздуха,
 $V=30$ м/мин, $Ra=8,4$ мкм.



Б+Ф, $h_{\text{CP}}=0,11$ мм, $t_{\text{выд}}=8$ ч, $T=860^{\circ}\text{C}$,
 $R_z=1020$ Н
 НВ=255, охлаждение на спокойном воздухе,
 $V=60$ м/мин, $Ra=9,9$ мкм.



Ф+П_{ГЛ}, $h_{\text{CP}}=0,12$ мм, $t_{\text{выд}}=8$ ч, $T=840^{\circ}\text{C}$,
 $R_z=938$ Н
 НВ=179, охлаждение с печью, $Ra=6,1$ мкм.



Ф+П+Б, $h_{\text{CP}}=0,11$ мм, $t_{\text{выд}}=10$ ч, $T=860^{\circ}\text{C}$,
 $R_z=1042$ Н, НВ=229, охлаждение на спо-
 койном воздухе, $Ra=10,4$ мкм.

Рис. 1. Микроструктура стали 20ХНЗА при различных режимах термообработки

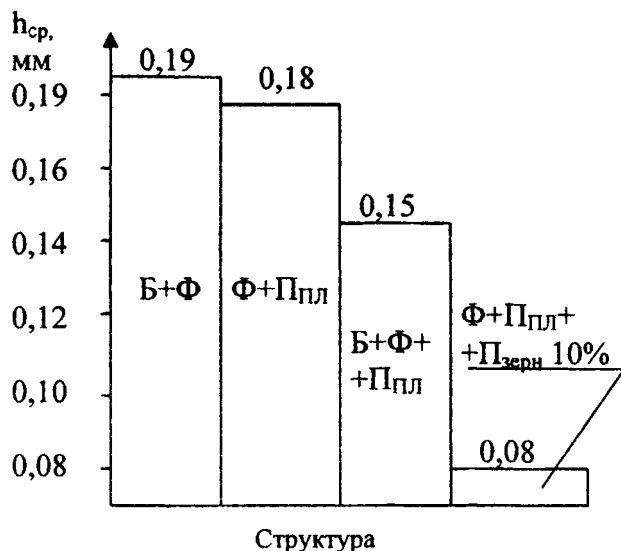


Рис. 2. Зависимость износа резцов от структуры стали 20XN3A

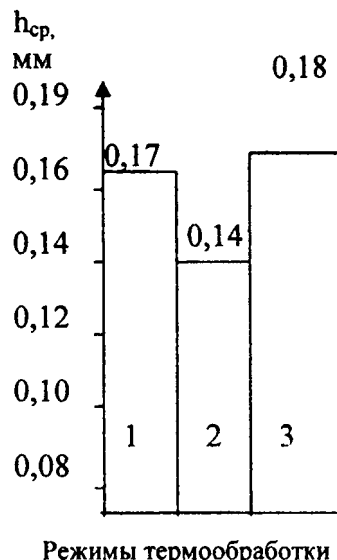


Рис. 3. Зависимость износа резцов от режимов термообработки

Выводы

1. На обрабатываемость сталей резанием значительное влияние оказывают химический состав, режимы термообработки, особенно скорость охлаждения, твердость, действительный предел прочности, пластические свойства и структура стали.
2. Самые стабильные результаты по структуре и обрабатываемости стали 20XN3A дает охлаждение в струе воздуха.
3. Из всех полученных структур наилучшей обрабатываемостью обладает структура Ф+П_{пл}+ П_{зери} 10%.
4. Наиболее стабильной и чаще других встречающейся структурой при охлаждении в струе воздуха является структура Б+Ф. Ее обрабатываемость в сильной степени зависит от скорости резания: при скоростях до $V=30$ м/мин обрабатываемость хорошая, при $V=60$ м/мин и выше – резко ухудшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. П.И. Ящерицын и др. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Мн.: Выш. шк., 1990. – 512 с.: ил.
2. В.М. Кишуров. Влияние химического состава и физико-механических свойств металлов и сплавов на обрабатываемость резанием.
3. Фельдштейн Э.И. Обрабатываемость сталей в связи с условиями термической обработки и микроструктурой. – М., 1953. 235 с.: ил.
4. Г.И. Беляева, В.Д. Русый, В.А. Бакин. Влияние термической обработки на обрабатываемость стали резанием. – Машиностроение, 1985, вып. 10, с. 117-120.
5. Араки Т. Обрабатываемость сталей. Пер. с японского „Нихон киндзоку гаккай кайхо“, 1978, т.17, №2, с. 94-98.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАК ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАДАЧИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Актуальной является проблема формирования качественного инженерного мышления у студентов, умения решать сложные конструкторские и технологические задачи современного производства с привлечением знаний, полученных за весь период обучения в вузе. Это возлагает на выпускающие кафедры ответственность не только за результаты завершающего этапа обучения, но и всего процесса обучения в целом.

Необходимо довести до студентов обширные сведения из теории резания, проектирования и эксплуатации металлорежущего оборудования и инструментов, сочетающие большой производственный опыт и результаты многочисленных научных исследований. При ограниченном количестве часов аудиторных занятий повышается значимость самостоятельной работы студентов при изучении специальных дисциплин. Дополнительные потенциальные возможности формирования инженерного мышления связаны с применением математических методов в специальных дисциплинах. Привлечение этих возможностей представляется важным как в контексте эффективности учебного процесса, так и в контексте значимости свободного владения математическими методами для инженера в ходе его дальнейшей трудовой деятельности. Еще большее значение это имеет для инженеров-исследователей и научных работников.

Представляется важным решение задач и упражнений, закрепляющих и развивающих теоретические положения специальных дисциплин. По мере возможности, эти задачи и упражнения должны и тренировать математическое мышление студентов, привлекая для своего решения математический аппарат различного уровня сложности.

При изучении таких дисциплин, как «Теория резания», «Резание материалов», «Теория обработки материалов», в пятом семестре студентами машиностроительных специальностей подробно рассматривается механизм возникновения шероховатости обработанной поверхности. Выявление и закрепление причинно-следственных связей между параметрами шероховатости, геометрией режущего инструмента и элементами режима резания будет более успешным, если происходит в активной форме. Поэтому представляет интерес вывод формулы для определения геометрической составляющей шероховатости обработанной поверхности из простых соображений. Такая задача при ее самостоятельном решении студентами дает возможность применить недостаточно задействованные в процессе изучения специальных дисциплин математические способности и почувствовать радость творчества. Сделать вывод этой формулы можно, например, следующим образом.

На рис. 1 приведена схема резания при продольном точении резцом с незакругленной вершиной, имеющим нулевые продольный и поперечный передние углы. Эта схема наиболее проста для рассмотрения. Уравнения режущих кромок в инструментальной системе координат имеют вид

$$\begin{cases} y = x \cdot \operatorname{tg} \varphi, & x \geq 0, \\ y = -x \cdot \operatorname{tg} \varphi, & x < 0. \end{cases} \quad (1)$$

Уравнения положения режущих кромок, занимаемых ими когда заготовка была повернута на угол 2π в обратном направлении, принимают следующий вид:

$$\begin{cases} y = (x + S) \cdot \operatorname{tg} \varphi, & x \geq -S, \\ y = -(x + S) \cdot \operatorname{tg} \varphi_1, & x < -S. \end{cases} \quad (2)$$

где φ – главный угол в плане; φ_1 – вспомогательный угол в плане; S – подача, мм/об.

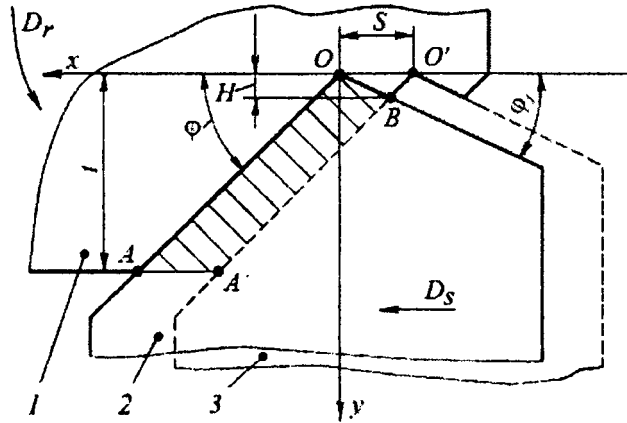


Рис. 1 – Схема несвободного резания резцом с незакругленной вершиной.

1 – заготовка; 2 – положение резца в рассматриваемый момент времени; 3 – положение резца, соответствующее повороту заготовки в обратном направлении на угол 2π ; D_r – главное движение; D_s – движение подачи; t – глубина резания

Решая совместно второе уравнение системы (1) и первое уравнения системы (2), для точки $B(x_B; y_B)$ имеем

$$\begin{aligned} -x_B \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 &= (x_B + S) \cdot \operatorname{tg} \varphi, \\ -S \cdot \operatorname{tg} \varphi &= x_B \cdot (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1), \\ x_B &= -\frac{S \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1}, \\ y_B &= -x_B \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{S \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1}. \end{aligned}$$

Ордината точки B определяет геометрическую составляющую H шероховатости обработанной поверхности для рассматриваемой схемы резания, т. е.

$$H = \frac{S \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1}. \quad (3)$$

Кроме того, из приведенного рисунка видно, что площадь сечения срезаемого слоя, определяется площадью фигуры $AOBA'$:

$$f = F_{OAA'O'} - F_{OBO'},$$

или

$$f = t \cdot S - \frac{S^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{2 \cdot (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1)}. \quad (4)$$

Вывод формулы (4) для определения площади сечения срезаемого слоя при принятых исходных данных – пример еще одной задачи для самостоятельного решения студентами.

Формулы (3) и (4) можно модифицировать. Как известно,

$$\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\sin(\varphi + \varphi_1)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_1},$$

поэтому

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{\frac{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_1}}{\frac{\sin(\varphi + \varphi_1)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_1}} = \frac{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}.$$

С учетом последнего выражения формулы (3) и (4) принимают следующий вид:

$$H = \frac{S \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}. \quad (5)$$

$$f = t \cdot S - \frac{S^2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{2 \cdot \sin(\varphi + \varphi_1)}.$$

Формула (5) приводится в учебнике [1]. Она позволяет в первом приближении оценить шероховатость обработанной поверхности, что важно при назначении подачи S при чистовом точении.

Решение этой инженерной задачи требует привлечения сведений из элементарной геометрии и тригонометрии, закрепляет связи между такими разделами, как «Геометрия режущего лезвия. Элементы режима резания и срезаемого слоя» и «Формирование геометрии обработанной поверхности и физико-механических свойств поверхностного слоя детали». Надо полагать, что студент, решивший самостоятельно эту задачу, не сделает впоследствии распространенной ошибки, когда подача при чистовом точении назначается без учета требований к шероховатости обработанной поверхности.

Продемонстрированный подход легко реализуется и при решении более общей задачи определения геометрической составляющей для продольного точения резцом с закругленной вершиной, что позволяет дать более точную оценку шероховатости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П. И., Фельдштейн Е. Э., Корниевич М. А. Теория резания – Минск, Новое знание, 2006 – 512 с.

АРМИРОВАНИЕ МНОГОГРАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА БАЗЕ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ КРИВЫХ

*УО «Полоцкий государственный университет»
г. Новополоцк, Беларусь*

Введение. Многогранные поверхности с плоскими, выпуклыми и вогнутыми гранями распространены в конструкциях деталей машин, в частности, бесшпоночных моментопередающих соединениях. Благодаря технологическим и эксплуатационным преимуществам по сравнению со шлицевыми такие соединения все шире применяются в зарубежном машиностроении в различных машинах, металлорежущих станках, инструментальных системах, технологической оснастке и других изделиях. В отечественном машиностроении бесшпоночные соединения применяются редко, что связано с нерешенностью теоретических и конструкторско-технологических задач, к которым следует отнести синтез рациональных схем формообразования, создание станочного оборудования, специального инструментального обеспечения и т. д.

Многогранная поверхность, являясь разновидностью цилиндрической поверхности, формируется прямолинейной образующей, которая, перемещаясь по направляющей – профилю поверхности, остается параллельной заданной прямой. Поэтому в зависимости от формы направляющей многогранная поверхность может иметь профиль в виде одной плавной замкнутой линии или множества пересекающихся линий. Деталь может быть ограничена соответственно одной или множеством цилиндрических поверхностей, которые обычно являются конгруэнтными и образуют поверхность с периодически повторяющимся профилем. Профиль граней может быть очерчен разными линиями (равной ширины, синусоидальными, циклоидальными и т.д.), для воспроизведения которых требуются соответствующие станки. Выбор конкретного вида профилирующей кривой часто зависит от имеющегося оборудования.

Известно, что профилирование цилиндрической поверхности с периодически повторяющимся профилем, как и любой другой линейчатой поверхности, возможно методами копирования, следа, касания и обката, различающимися материальными носителями формы образующей производящей линии, универсальностью и сложностью реализации. Из них заслуживает внимания благодаря простой конструкции режущего инструмента, универсальности и простоте реализации метод следа, при котором производящим элементом является точка (вершина резца). В статье рассматривается формирование многогранных поверхностей этим методом на базе циклоидальных кривых, что связано с относительной простотой их получения при обработке резанием.

Схемы профилирования многогранных поверхностей. Циклоидальная кривая образуется сообщением производящей точке двух согласованных вращательных движений (рис. 1, а, в), что предопределяет несложность схем обработки и станочного оборудования и может быть реализовано двумя способами:

1. С помощью планетарного зубчатого механизма. В этом случае исполнительный орган станка, несущий режущий инструмент, должен совершать относительно неподвижной заготовки такое же движение, как спутник планетарного зубчатого механизма (рис. 1, а, в). Например, схема по рис. 1, а основана на сообщении производящему элементу вращательного движения B_1 вокруг оси L_1 и одновременно вращательного движения B_2 вокруг оси L_2 . Она обеспечивает формообразование профилей с равномерно расположенными конгруэнтными участками, форма которых определяется отношением угловых скоростей этих движений, их направлением, числом режущих элементов инструмента, а также геометрическими параметрами схемы обработки. Оси вращательных движений могут быть параллельны, пересекаться или скрещиваться.

Вторая схема (рис. 1, в) отличается тем, что оси L_1 и L_2 в момент обработки находятся по одну сторону от производящего элемента. Благодаря этому обработка осуществляется по попутной схеме, при которой скорость движения формообразования равна разности линейных

скоростей инструмента и заготовки в точке их контакта, что обеспечивает лучшие условия резания при одинаковой производительности. Первая схема реализуется резцовой головкой внешнего касания, а вторая охватывающей резцовой головкой, совершающей планетарное движение вокруг неподвижной заготовки.

2. Относительное планетарное движение инструмента и заготовки создается согласованными вращательными движениями исполнительных органов станка непланетарного типа, несущих заготовку и инструмент (рис. 1, б, г). Благодаря отсутствию в данном случае реального планетарного зубчатого механизма, упрощается конструкция и повышается жесткость формообразующей системы станка. Поэтому в большинстве случаев с точки зрения сложности реализации и обеспечения большей универсальности предпочтительно разделение вращательных движений между инструментом и заготовкой.

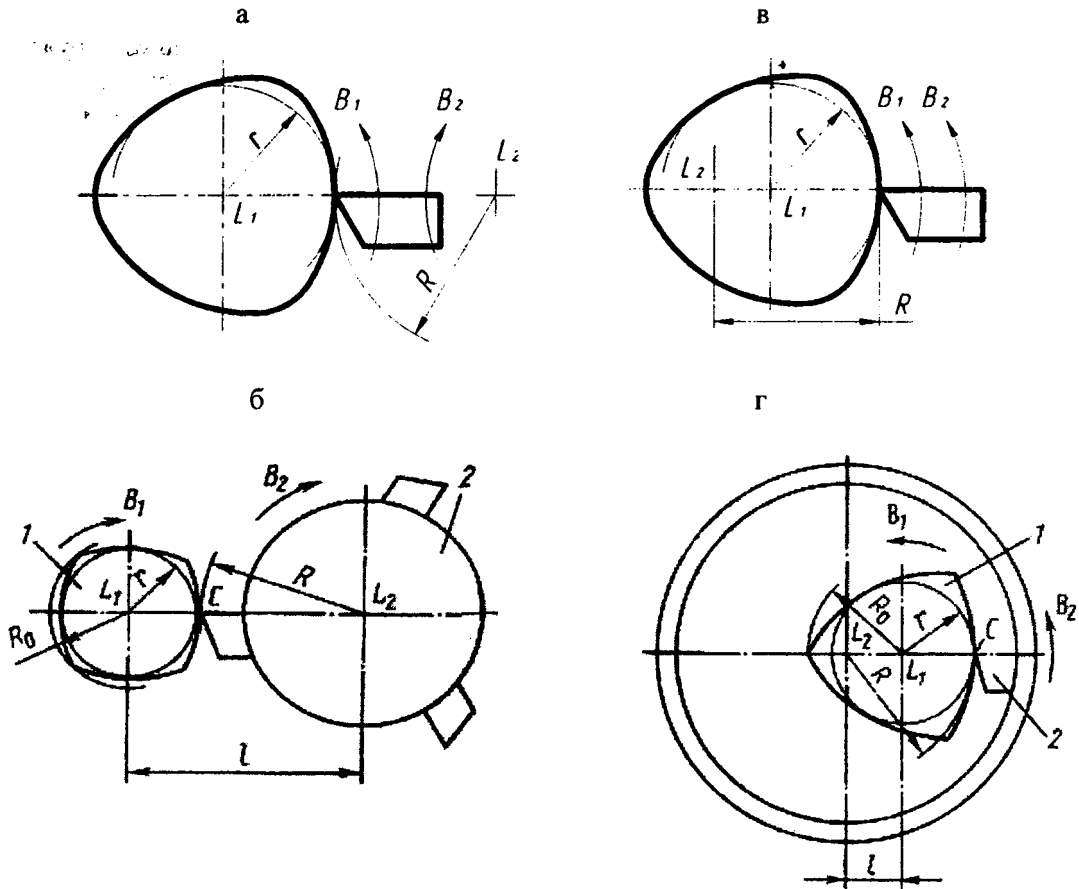


Рис. 1. Принципиальные (а, в) и практические (б, г) схемы формирования многогранных поверхностей методом следа

Во всех случаях образуемый профиль определяется кинематическим соотношением, геометрическими параметрами и относительным расположением траекторий элементарных движений, создающих движение формообразования, а также числом производящих элементов и их относительным расположением. Кинематическое соотношение элементарных движений задается таким образом, чтобы вектор скорости результирующего движения был направлен по касательной к образуемой линии.

В зависимости от соотношения скоростей вращательных движений и числа производящих элементов конгруэнтные участки профиля в виде плоских линий могут формироваться в порядке их расположения вдоль профиля или в заданной последовательности. С учетом этого отношение i частот вращательных движений резцовой головки и заготовки определяется по формуле [1].

$$i = \frac{m}{z p}, \quad (1)$$

где m – число граней; z – число резцов в головке; p – целое число, задающее последовательность обработки граней.

С кинематической точки зрения циклоидальная линия обычно рассматривается как траектория точки, расположенной определенным образом в плоскости производящей окружности радиусом r , катящейся без скольжения по неподвижной окружности радиуса R [2] (рис. 2, а, б). При этом производящая точка M может быть расположена внутри, вне или на производящей окружности.

При внешнем касании производящей и направляющей окружностей (см. рис. 2, а) образуются эпициклоидальные, а при внутреннем касании (см. рис. 2, б) – гипоциклоидальные кривые.

К геометрическим параметрам теоретических схем формирования циклоидальных кривых относятся:

- радиус R направляющей и радиус r производящей окружностей;
- расстояние d между производящей точкой M и центром O_1 производящей окружности;
- расстояние l между центрами O и O_1 направляющей и производящей окружностей, которое при внешнем их касании составляет $l = R + r$, а при внутреннем касании – $l = R - r$.

Кинематическим параметром рассматриваемых схем, влияющим на форму образуемой линии, является отношение угловых скоростей вращательных движений:

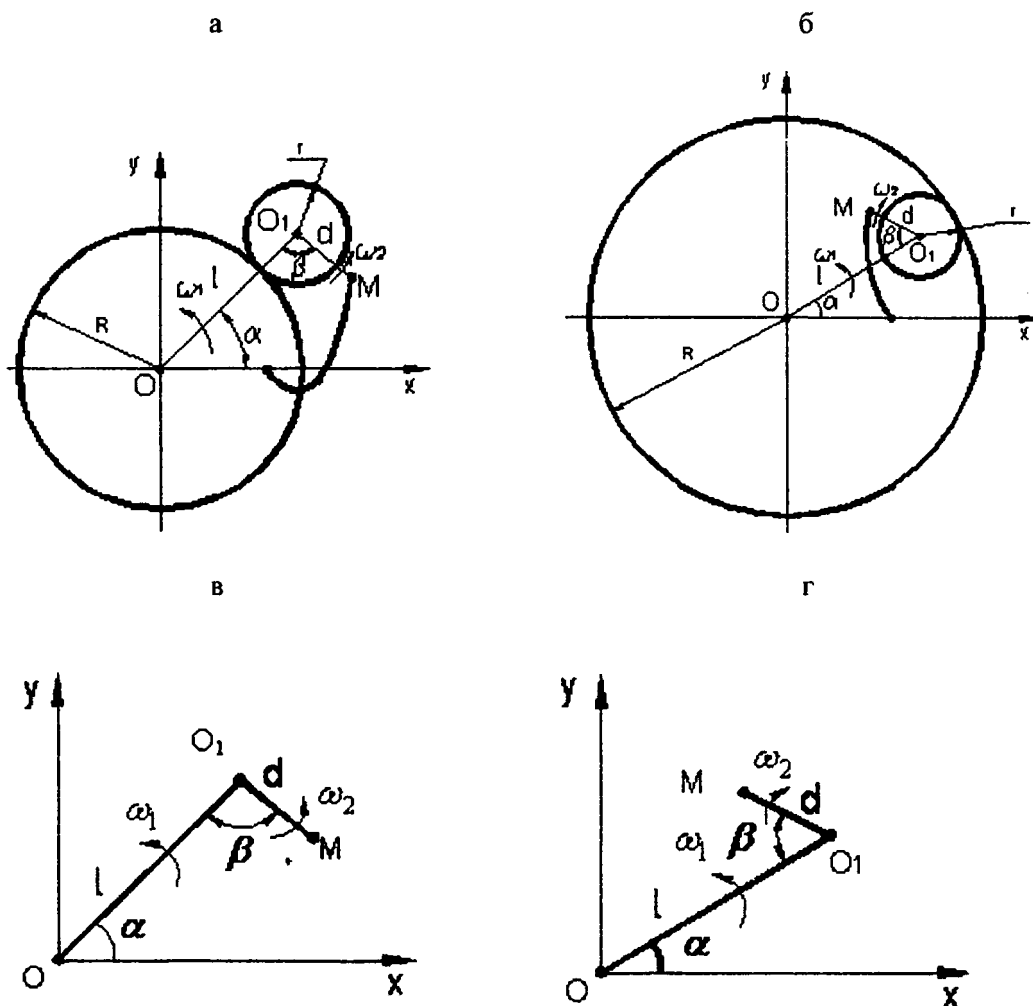


Рис. 2. Теоретические (а, б) и расчетные (в, г) схемы формирования эпициклоидальных (а, в) и гипоциклоидальных (б, г) кривых

$$i = \beta / \alpha,$$

где β - угол поворота производящей точки М от начального положения, соответствующий углу α поворота центра O_1 относительно центра O .

В начальном положении точки O , O_1 и M расположены на одной прямой, а точка M находится между точками O и O_1 и, следовательно, формирует наиболее близкую к центру O точку образуемой линии.

Анализ схем профилирования. Применительно к анализу практических схем формообразования многогранных поверхностей на станках (см. рис 1, б, г) удобно формируемую линию рассматривать как траекторию конечной точки M многозвенного механизма [3], представляющую вершину резца (рис. 2, в, г). При обработке по схеме в соответствии с рис. 1, б она описывается параметрическими уравнениями

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha - d \cos(i+1)\alpha \\ y = l \sin \alpha - d \sin(i+1)\alpha. \end{cases} \quad (2)$$

где $l = R + r$.

Аналогично, при формировании гипоциклоидальных кривых по схеме в соответствии с рис. 1, г траектория описывается системой уравнений

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha - d \cos(i-1)\alpha \\ y = l \sin \alpha + d \sin(i-1)\alpha. \end{cases} \quad (3)$$

где $l = R - r$.

В схемах обработки непланетарного типа (см. рис. 1, б, г) настраиваемыми являются расстояние l между осями вращательных движений инструмента и заготовки и расстояние d между производящей точкой M и осью ее вращения. В этой связи целесообразно уравнения формируемой линии выразить через настраиваемые параметры i , d и коэффициент $\eta = l/d$. С учетом этого систему уравнений (2) можно записать в виде

$$\begin{cases} x = d(\eta \cos \alpha - \cos(i+1)\alpha) \\ y = d(\eta \sin \alpha - \sin(i+1)\alpha). \end{cases} \quad (4)$$

Система (4) представляет параметрические уравнения всего семейства эпициклоидальных кривых: обыкновенных при $\eta = i+1$, укороченных при $\eta > i+1$ и удлиненных при $\eta < i+1$.

Аналогично, уравнения (3) преобразуются в систему уравнений

$$\begin{cases} x = d(\eta \cos \alpha - \cos(i-1)\alpha) \\ y = d(\eta \sin \alpha + \sin(i-1)\alpha). \end{cases} \quad (5)$$

При $\eta = i-1$ формируются обыкновенные, при $\eta > i-1$ – укороченные и при $\eta < i-1$ – удлиненные гипоциклоиды.

Из множества формируемых по рассматриваемым схемам кривых в качестве траекторий исполнительных движений (производящих линий) при обработке многогранных поверхностей практический интерес представляют те, которые удовлетворяют условию замкнутости. Это возможно, если отношение i угловых скоростей ω_2 и ω_1 выражается целым числом или дробным рациональным числом вида $i=N/q$. В первом случае формируемая линия состоит из i , а во втором из N конгруэнтных участков и является замкнутой. При этом соседние конгруэнтные участки соединяются между собой в точках, равномерно расположенных по окружности. Дан-

ное обстоятельство обеспечивает возможность многократного перемещения формообразующей точки по одной и той же траектории, что необходимо при механической обработке многогранных поверхностей.

Анализ уравнений (4), (5) [4] показывает, что схема (рис. 2, а) позволяет формировать эпициклоидальные профили многогранных поверхностей в виде дуг окружности, кардиоиды, улитки Паскаля и роз, а схема (рис. 2, б) – гипоциклоидальные кривые в виде прямолинейных отрезков, дуг окружности, эллипса, астроида, кривой Штейнера и роз.

Например, применительно к схеме (рис. 2, г) согласно (2) при $i=1$ имеем

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha - d \\ y = l \sin \alpha \end{cases} \quad (6)$$

или

$$(x + d)^2 + y^2 = l^2. \quad (7)$$

Следовательно, формируемая линия представляет собой окружность, смещенную относительно начала координат. При наличии в резцовой головке нескольких режущих зубьев профиль многогранной поверхности представляет пересечение дуг окружностей, количество которых равно числу режущих зубьев.

При $i=2$ на основании (2)

$$\begin{cases} x = (l - d) \cos \alpha \\ y = (l + d) \sin \alpha \end{cases} \quad (8)$$

или

$$\frac{x^2}{(l - d)^2} + \frac{y^2}{(l + d)^2} = 1. \quad (9)$$

Из (7) следует, что при любых значениях l и d линия формируется в виде эллипса, малая полуось которого составляет $l - d$, а большая – $l + d$. Каждый производящий элемент образует две противоположные стороны профиля, общее количество которых поэтому в два раза больше числа производящих элементов (режущих зубьев резцовой головки).

С уменьшением разности $l-d$ эллипс сжимается вдоль малой оси, что позволяет использовать формируемые линии для профилирования с заданной точностью многогранных поверхностей с приближающимися к плоским гранями.

При $i=3$ и $\eta = 2$ формируемая линия в соответствии с (2) описывается уравнениями

$$\begin{cases} x = d(2 \cos \alpha - \cos 2\alpha) \\ y = d(2 \sin \alpha + \sin 2\alpha) \end{cases} \quad (10)$$

и состоит из трех конгруэнтных участков, образующих при любом, отличном от нуля, значении d треугольник с вогнутыми сторонами. При $i=4$ одним производящим элементом формируется четырехугольник и т.д.

Реализация схем обработки. Схема обработки многогранных поверхностей по рис. 1, б используется на станках-профиляторах фирмы «Wera» (ФРГ). Обе схемы (см. рис. 1, б, г) реализуются на широкоуниверсальном зубошлифрезерном станке модели ВС-50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» [5]. Для этого станок оснащен сменными модулями, один из которых предназначен для обработки многогранных поверхностей резцовой головкой внешнего касания (рис. 3, а), а второй – охватывающей резцовой головкой (рис. 3, б).

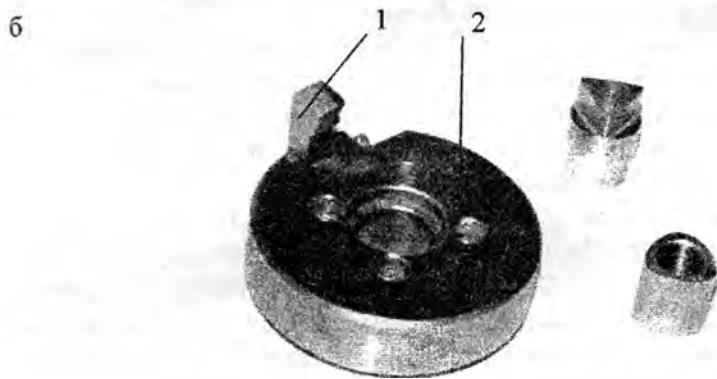
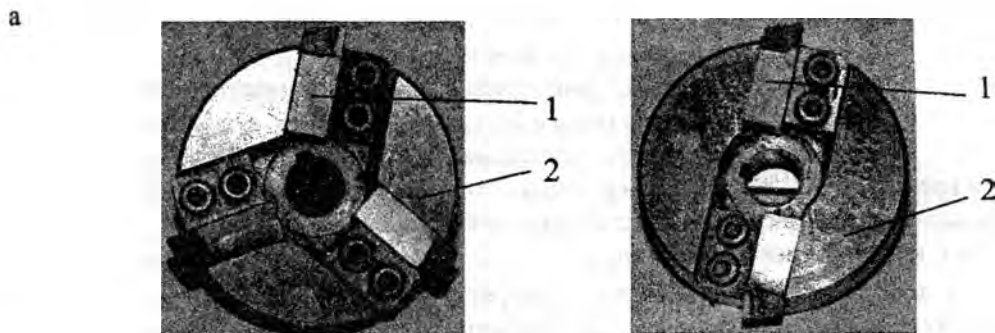


Рис. 3. Резцовые головки внешнего (а) и внутреннего касания (б) к станку модели ВС-50 с образцами обработанных деталей:
1 – резец; 2 – корпус

Рис. 4, а иллюстрирует технологические возможности схемы обработки резцовой головкой внешнего касания с равномерным расположением режущих элементов, количество которых $1 \leq z \leq 3$, по форме обработанных поверхностей при различных значениях отношения i частот вращательных движений инструмента и заготовки

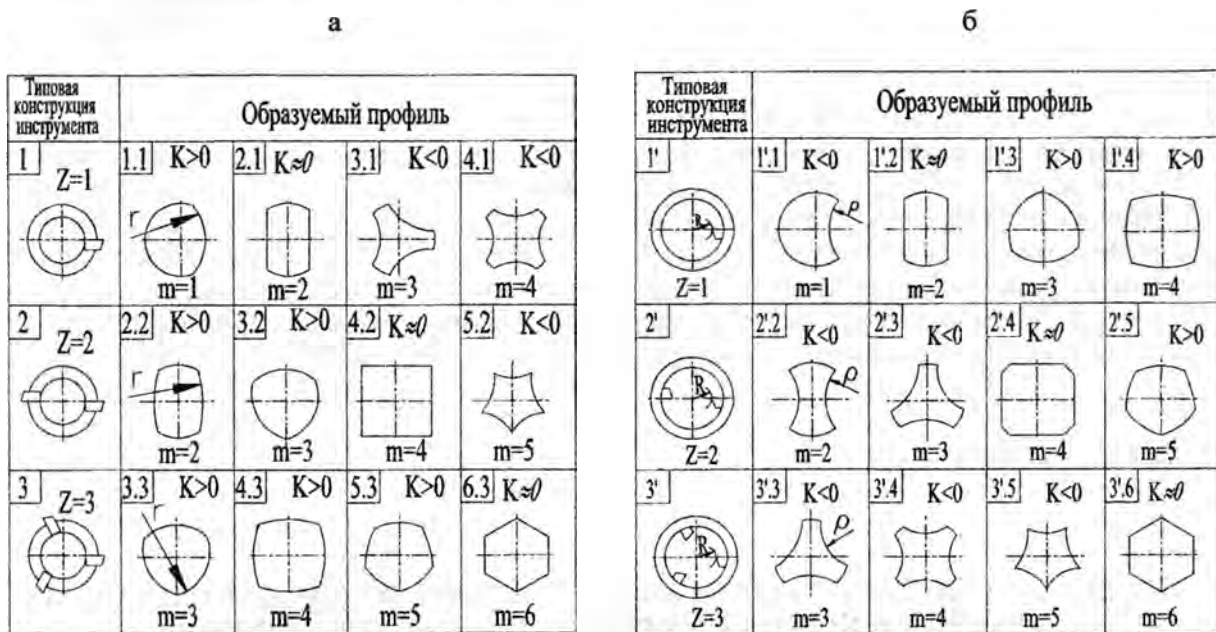


Рис. 4. Технологические возможности схемы обработки многогранных поверхностей резцовой головкой внешнего касания (а) и охватывающей резцовой головкой (б)

В приведенных обозначениях образуемых профилей первая цифра соответствует числу m граней, а вторая – числу z режущих зубьев. Отношение m/z этих чисел равно отношению i частот вращательных движений инструмента и заготовки при последовательном формировании граней профиля, т.е. при $p=1$. Изменением значения p обеспечивается управление формой про-

филя и, следовательно, повышение универсальности инструмента. Например, при $z=1$ и $p=2$ формируется трехгранная поверхность с выпуклыми гранями.

Значение i определяет форму граней, а произведение iz – их количество. Так, если $i=1$, то формируются профили 1.1, 2.2, 3.3 с числом граней $m=z$, очерченных по окружности, радиус r которой определяется уравнением (7). При $i=2$ независимо от z на заготовке обрабатывается четное число граней (профили 2.1, 4.2, 6.3), очерченных по эллипсу (9). За счет выбора диаметра d инструмента при необходимости они с требуемой точностью могут приближаться к плоским граням.

Независимо от конструкции головки при $1 \leq i < 2$ обработанные поверхности имеют выпуклые, а при $i > 2$ вогнутые грани. В каждом конкретном случае диаметр инструмента и геометрия его режущих зубьев определяется в зависимости от допускаемого изменения их рабочих углов и отклонения обработанных граней от заданной формы.

Для реализации схемы профилирования по рис. 1, r создан инструмент охватывающего типа, который с образцами обработанных им на станке модели ВС50 деталей показан на рис. 3, б. Он оснащен одним резцом 2, закрепленным в корпусе 1, поэтому им возможна обработка деталей с профилями типов 1'.1, 1'.2, 1'.3 и др. (рис. 4, б). В общем случае он может быть оснащен несколькими резцами (см. рис. 4, б, инструменты типов 2' и 3').

Управление формой поперечного сечения обработанной поверхности достигается за счет параметров i , z , и R . Например, при $i=1$ (профили 1'.1, 1'.2, 1'.3) обработанные грани спрофилированы по окружности, при $i=2$ (профили 1'.2, 2'.4, 3'.6) – по эллипсу. При $i < 2$ обрабатываются поверхности с вогнутыми, а при $i \geq 2$ с выпуклыми гранями. Однорезцовая головка позволяет обрабатывать также сопряженные наружные и внутренние многогранные поверхности профильного моментопередающего соединения с выпуклыми гранями. В общем случае количество резцов в головке определяется исходя из зависимости (1).

Таким образом, схемы обработки многогранных поверхностей, основанные на применении циклоидальных кривых, обладают высокой универсальностью по форме обрабатываемых поверхностей и реализуются на отечественных станках, что позволяет более широко применять профильные моментопередающие соединения в конструкциях машин и механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием. – Мн.: «Наука и техника», 1995. – 264 с. 2. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1997. – 870 с. 3. Карелин Н.М. Бескопирная обработка цилиндрических деталей. – М. Машиностроение, 1966. – 187 с. 4. Данилов В.А., Данилова Л.А. Кинематическое формирование производящих линий поверхности при обработке резанием на базе циклоидальных кривых // Вестник Полоцкого государственного университета, серия В "Прикладные науки". – №12. – 2004 – С. 44-53. 5. Данилов В. А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием // Инженер – механик. – 2003. – №3(20). – С. 26-31.

УДК. 621. 791

Дечко Э.М., Воронович А.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ КОНТАКТА ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН И КОРПУСОВ ФРЕЗ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Белорусский национальный технический университет

Интенсификация процессов резания при фрезеровании за счет применения высокоскоростных станков, увеличения режимов резания, объемов снимаемого припуска металла, использования новых инструментальных материалов и конструкций инструментов выявило ряд проблем, связанных с возрастанием центробежных сил в 3-10 раз, вызывающих раскрепление режущих пластин, кассет с пластинами и др.

Глубокие радиальные пазы, эксцентричные отверстия, дополнительные элементы крепежа, дисбаланс инструментальной оснастки и т.п. приводят к возникновению вибраций и напряжений, вызывающих разрушение корпусов и пластин инструмента. Эти проблемы возникают при работе торцовых и концевых фрез на частотах вращения шпинделя более 10000 об/мин [1].

Известны конструкции цельных и сборных фрез фирм Sandvik, ISKAR, Mitsubishi с различными формами режущей части и вариантами ее крепления, рис. 1...2.[2...5].

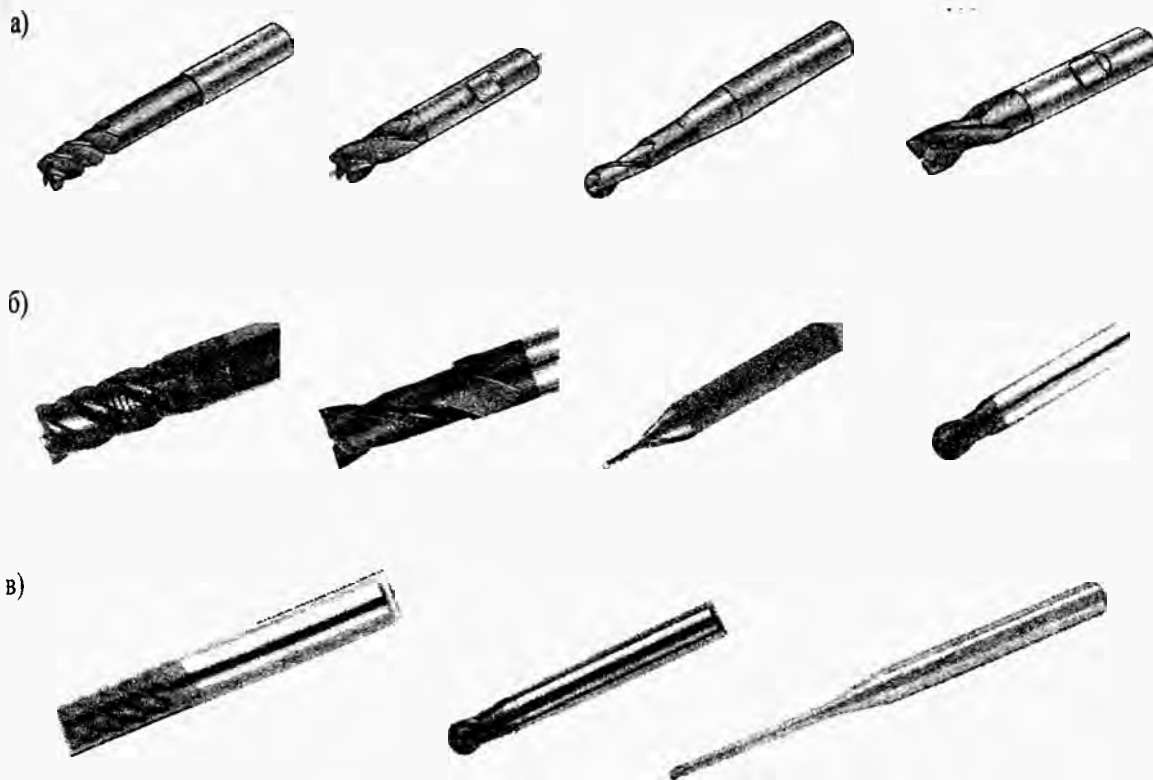


Рис. 1. Цельные твердосплавные фрезы фирм а) SANDVIK, б) ISKAR, в) MITSUBISHI

Для крепления рабочей части сборных концевых фрез (коронки) из твердого сплава используются различные соединения, рис. 2,а,б, в, г.

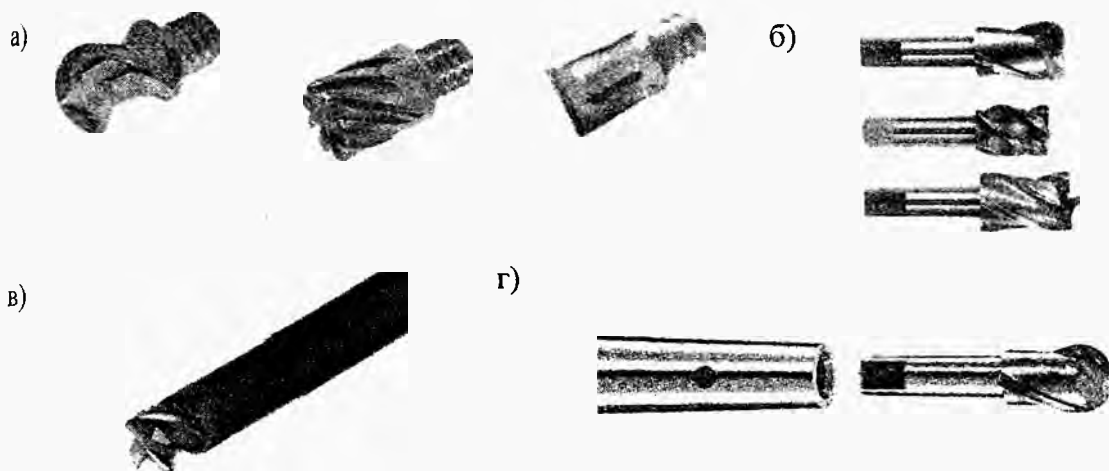


Рис. 2. Способы крепления коронок: а) коронки фирмы ISKAR; б) коронки фирмы NIKKEN; в) резьбовое крепление фирмы ISKAR; г) боковое крепление фирмы NIKKEN

Крепление пластинок твердого сплава осуществляется винтами, рис.3. На концевых фрезях малых диаметров пластинки крепятся винтами. Размещение прихватов практически не

используется. Пластины на рабочей части располагаются радиально (рис. 4,а), в том числе в диаметральном пазе корпуса (рис. 4,б), и тангенциально (рис. 5,в).

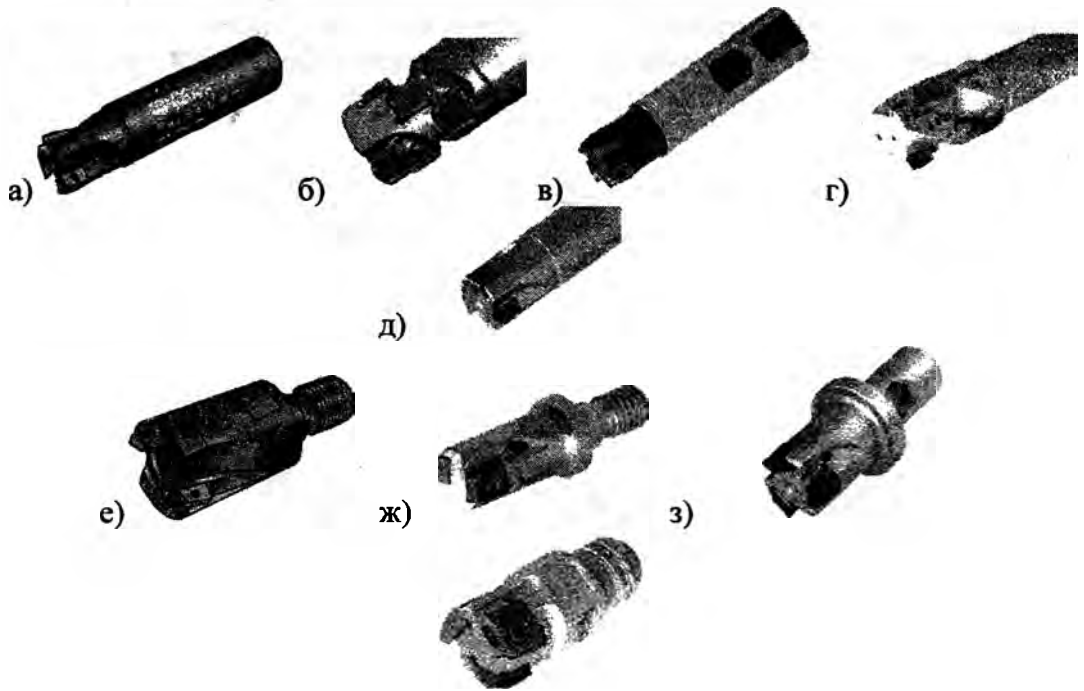


Рис. 3. Варианты крепления твердосплавных пластин на рабочей части концевой фрезы: а) радиальным расположением пластин SANDVIK ; б) фреза с тангенциальным расположением пластин фреза с удлиненной стружечной канавкой ISKAR; з) фреза с радиальным расположением пластин IS фреза с удлиненной стружечной канавкой ISKAR; е) крепление головки с метрической резьбой SANDVIK; ф) крепление головки с прямоугольной резьбой ISKAR; з) крепление головки с метрической резьбой ISKAR; и) головки боковым зажимом ISKAR

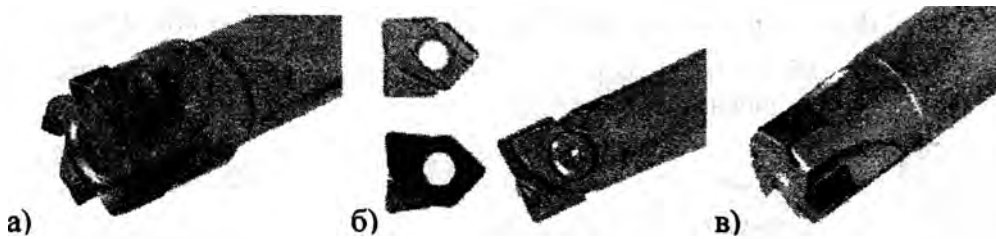


Рис. 4. Виды расположения пластин на концевых фрезях: а, б) радиальное расположение пластин; в) тангенциальное расположение пластин

Для проверки мнений об увеличении жесткости корпуса и разгрузке сердцевины концевой фрезы при тангенциальном расположении пластин проведены исследования 3D моделей концевых фрез с радиальным и тангенциальным расположением пластин.

Модели были импортированы в программу ANSYS Workbench, где были созданы сетки конечных элементов: тело фрезы 0,002м, пластина 0,0007м, винт 0,001м; поверхности гнезда под пластину и нагружаемая поверхность пластины – 0,0005м.

Винт крепления пластины затянут с силой 5000Н. Условно воздействие сил резания на пластину нагрузка принято 700Н, рис. 5.

Величины напряжений качественно оценивались по цвету области: чем «горячее», темнее, цвет тем больше напряжение и наоборот. Количественное значение оценивалось постаново

кой «проб» ($3.5996e+007$), которые указывают значение напряжения в выбранной точке в паскалях.

а)

б)

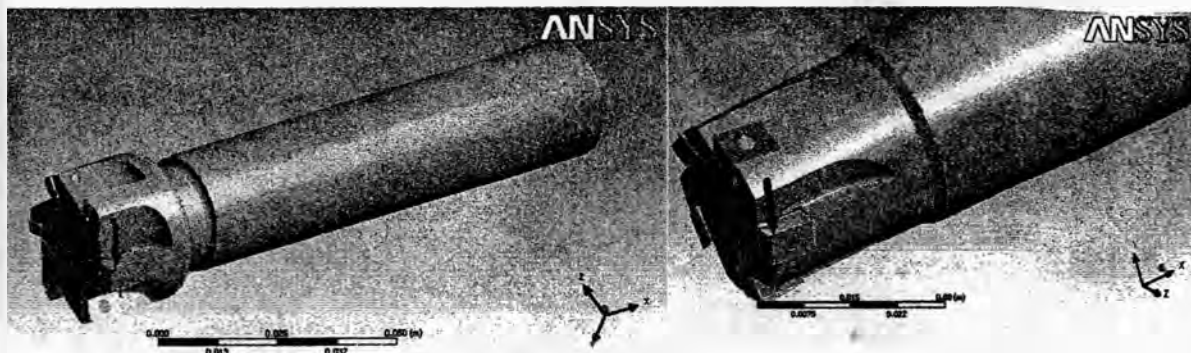


Рис. 5. Нагружение фрез в пакете ANSYS с расположением пластин:
а) радиально; б) тангенциальным

Исследованы напряжения в различных зонах контактов корпуса, пластин и крепежного винта при радиальном и тангенциальном креплений: контакты пластин с корпусом по опорной плоскости и торцу; со стороны образующей цилиндра корпуса, в зоне винт-пластина и винт-корпус, рис. 6...13.

Установлены следующие величины напряжений:

1) радиальное крепление пластин: по опорной плоскости – 87...357МПа, рис. 8; по торцу – 18...157МПа, рис. 6; со стороны образующей цилиндра корпуса – 60...160МПа, рис. 7; в поверхностях гнезд, где находится винт 100...150 МПа, около винта – 300-357МПа

2) тангенциальное крепление пластин: по опорной плоскости – 70...71МПа, рис. 12; по торцу – 62...34МПа, рис. 10; со стороны образующей цилиндра корпуса – 8 до 70МПа, рис. 11; в поверхностях гнезд, где находится винт – 58МПа и на участках, близких к винту – 740МПа.



Рис. 6. Нагруженная пластина радиальной фрезы (торец)

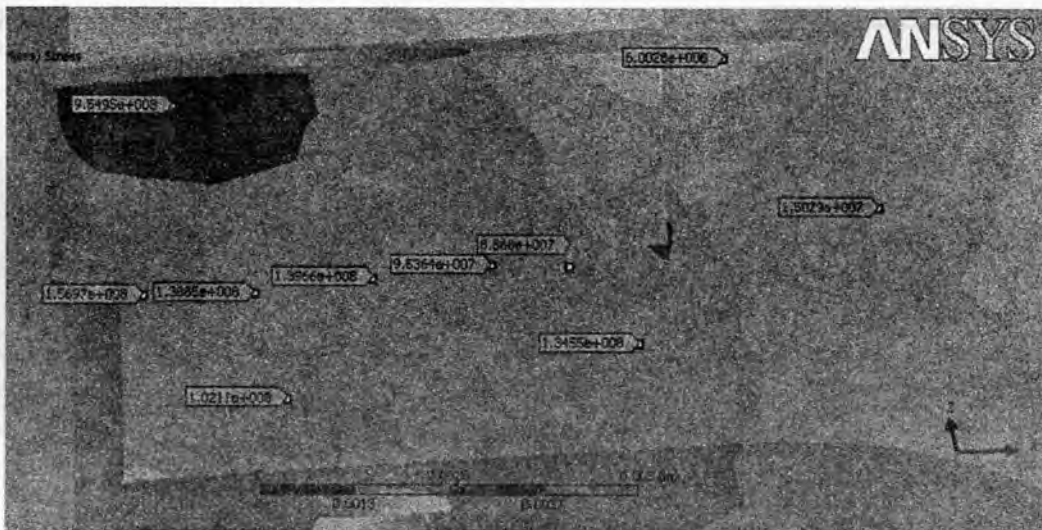


Рис. 7. Нагруженная пластина радиальной фрезы (боковая сторона)

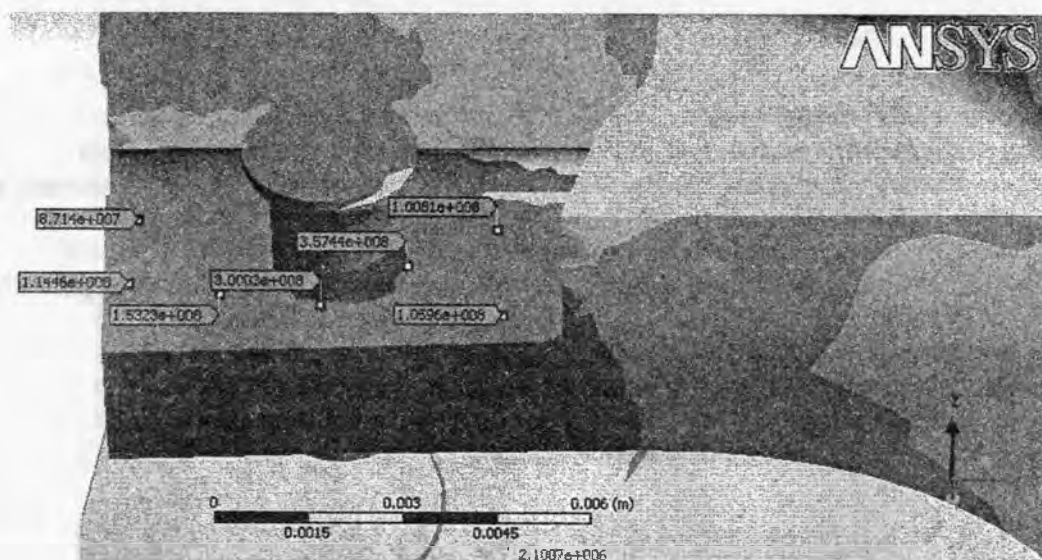


Рис. 8. Гнездо под пластину радиальной фрезы (пластина не показана)

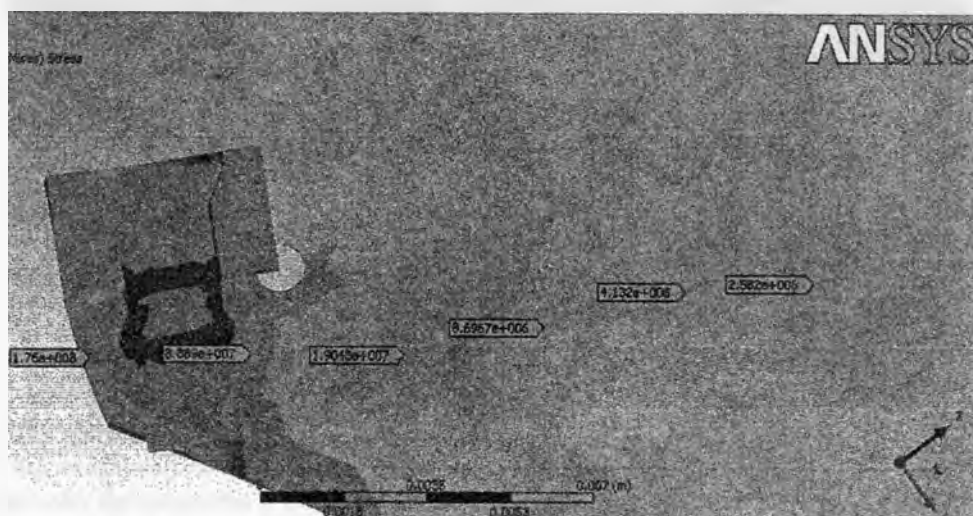


Рис. 9. Разрез перпендикулярно оси радиальной фрезы

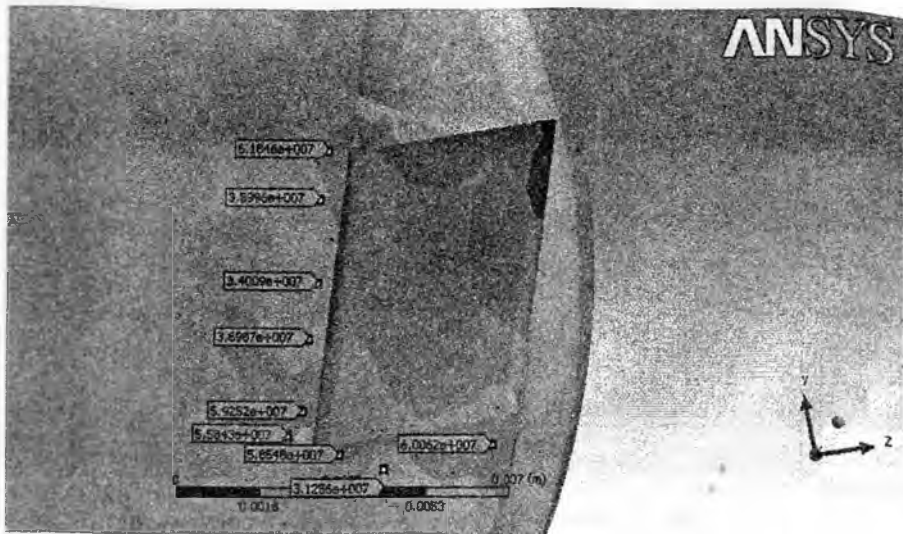


Рис. 10. Нагруженная пластина тангенциальной фрезы (торец)

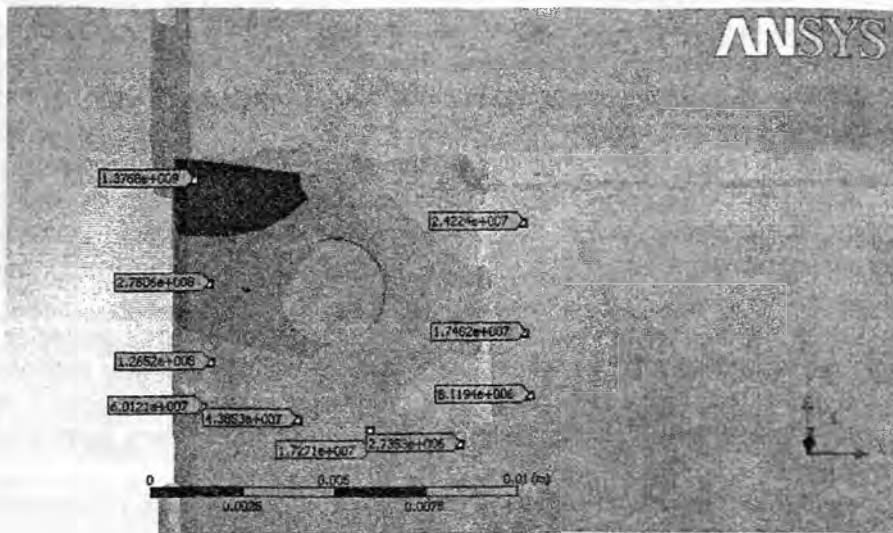


Рис. 11. Нагруженная пластина тангенциальной фрезы (боковая сторона)

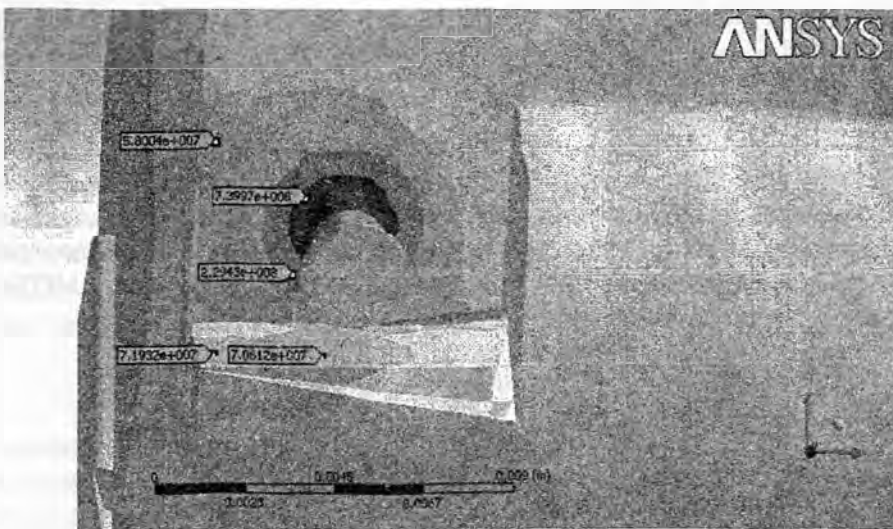


Рис. 12. Гнездо под пластину тангенциальной фрезы (без пластины)

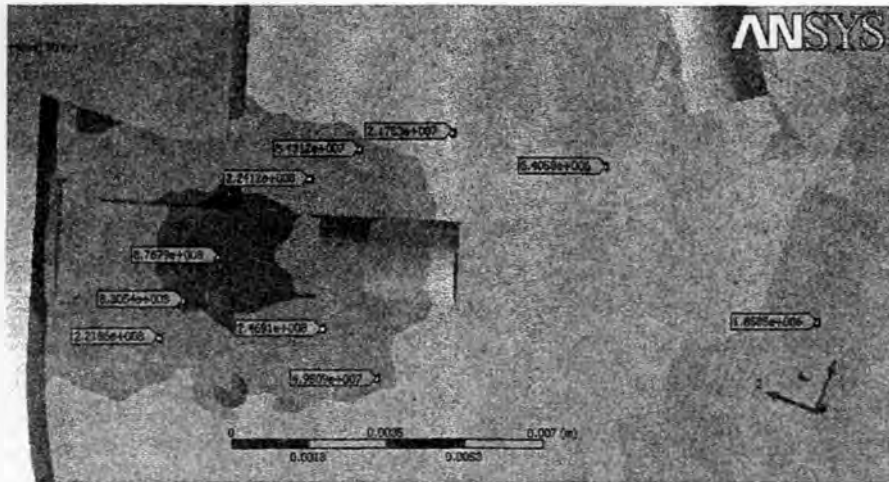


Рис. 13. Разрез перпендикулярно оси тангенциальной фрезы

Выводы.

1. Наибольшая нагрузка и соответственно напряжения при радиальном расположении пластин наблюдаются на опорной поверхности гнезда, на которую нагрузка передается через пластину.

2. При тангенциальном расположении пластин нагрузку воспринимает поверхность, несущая винт. Плоскость действия нагрузки проходит через винт. Нагрузка воздействует вначале на винт и затем – на опорную поверхность гнезда, и винт работает, как жестко защемленная балка.

3. В центральной области корпуса концевой фрезы с тангенциальным расположением пластин наблюдаются более равномерное распределение напряжений по сравнению с фрезой с радиальным расположением пластин. Величины напряжений составляют для концевых фрез с радиальным расположением пластин 2,5МПа, а и для концевых фрез с тангенциальным расположением пластин – 1,8МПа.

4. Область около гнезда со стороны торца фрезы при тангенциальном расположении пластин имеет напряжения в 1,8 раза меньшие, чем у фрез с радиально расположенными пластинами. Зона гнезда со стороны образующей цилиндра корпуса для фрез с тангенциальным расположением пластин имеет напряжения в 2,8 раза меньшие, чем у фрез с радиальным расположением пластин.

5. Разгрузка центральной части фрезы с тангенциальным расположением пластин незначительна. Напряженная область около крепежного винта при радиальном расположении пластин распространяется по всей зоне контакта пластины и корпуса. В концевой фрезе с тангенциальным расположением пластин напряжения сосредоточены вокруг отверстия.

Величины напряжений в фрезях концевых с тангенциальным расположением пластин выше (напряжения 224...247МПа), чем с радиальным расположением пластин, где область напряжений около винта составляет 88МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов А.Р. Приспособления для металлообрабатывающего инструмента: Справочник. 2-е изд. исправ. и доп. Библиотека инструментальщика – М.: Машиностроение, 2002 – 256 с.: ил.
2. Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия Металлообработка. Журнал № 2/123/2010 .
3. Каталог SANDVIK Coromant 2009.
4. www.iscar.com.
5. MITSUBISHI каталог 2007-2009. pdf

МЕТОД ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИН

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Изготовление машин начинается с момента придания исходным материалам геометрических параметров и физико-механических свойств, требуемых ей, по техническим условиям и заканчивается испытаниями. В природе крайне мало продуктов и предметов, пригодных для человека в готовом виде. Это заставляет его затрачивать труд для качественного изменения последних с целью их использования в жизни. Качественные преобразования, содержащие действия по изменению состояния предмета производства, получило название «технологический процесс». [1]

В процессе обработки нежестких деталей сложной формы, например лопаток газовых турбин, упругие деформации заготовки от действия результирующей силы резания составляют значительную долю в общих деформациях технологической системы.

Определение упругих деформаций заготовки необходимо с целью повышения точности обработки лопаток турбин на копировальных станках путем как предискажения копиров на величину суммарной динамической погрешности, так и введения добавочных элементов конструкций станков, увеличивающих жесткость технологической системы СПИД. Аналитические, экспериментально подтвержденные методы, позволяют рассчитывать коррекцию копиров на стадии их проектирования.

Известна методика определения перемещения точек профиля крупногабаритных лопаток под действием силы резания для типового случая установки и закрепления лопаток, расчеты которой целесообразно производить с помощью ЭВМ. На наш взгляд, интересна методика приближенного аналитического расчета упругих деформаций лопатки от действия на нее результирующей силы резания для случая, когда хвостовая часть лопатки жестко закреплена, а головная часть поджата задним центром. [2] Следовательно, такую схему установки можно представить в виде стержня, на одном конце которого заделка, а на другом – подвижная опора. Для простоты расчетов перо лопатки заменяют тонкой прямоугольной пластиной переменного сечения, закрепленной аналогичным методом.

До начала обработки определяются максимальные суммарные напряжения, вызванные центробежными силами и силами сопротивления рабочей среды, а при растяжении создаются в лопатках максимальные напряжения, равные упомянутым суммарным напряжениям.

Способ обработки лопаток турбин осуществляется следующим образом.

Перед обработкой лопаток определяют центробежную силу, действующую на лопатку в реальных условиях (с учетом массы лопатки и ее угловой скорости)

$$N_y = \frac{mV^2}{R},$$

где m – масса лопатки;

V – линейная скорость;

R – радиус (растяжение от оси вращения до центра тяжести лопатки).

Затем определяют направление, вызванное центробежной силой, по формуле

$$\sigma_y = \frac{N_y}{F}, \text{ кг/мм}^2$$

где F – площадь минимального сечения лопатки, мм^2 .

После этого экспериментальным путем определяют силу сопротивления рабочей среды и считают точкой ее приложения центр тяжести лопатки. По изгибающему моменту определяют напряжения в минимальном сечении лопатки (возле ее хвостовика)

$$\sigma_c = \frac{M_{\max}}{W},$$

где W – момент сопротивления минимального сечения лопатки;
 M_{\max} – максимальный изгибающий момент от действия силы сопротивления рабочей среды.

Определяют суммарные напряжения лопатки

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_y + \sigma_c = \frac{N_y}{F} + \frac{M_{\max}}{W}.$$

Начинают обработку лопатки, для чего к ней прикладывают напряжения, равные σ_{Σ} при этом усилии растяжения, приложенное к лопатке, делят на площадь ее минимального сечения.

Пример реализации способа обработки лопатки турбины 4 ступени:

минимальное сечение лопатки, $F_{\text{л}}=30 \text{ мм}^2$;

напряжения, вызванные центробежными силами, $\sigma_y = 36 \text{ кг/мм}^2$;

напряжения, вызванные силами сопротивления рабочей среды, $\sigma_c = 24 \text{ кг/мм}^2$;

суммарное напряжение в лопатке, $\sigma_{\Sigma} = 24+36=60 \text{ кг/мм}^2$;

требуемое усилие растяжения в лопатке, $P_{\text{раст}} = \sigma_{\Sigma} \cdot F_{\text{л}} = 60 \cdot 30 = 1800 \text{ кг}$.

Применение предлагаемого метода обработки лопаток турбин позволяет повысить эксплуатационную надежность работы лопаток, что является весьма важным фактором, так как выход из строя одной лопатки приводит к авариям.

Технико-экономическая эффективность от внедрения такого метода обусловлена повышением надежности лопаток турбин. [3]

ЛИТЕРАТУРА

1. Кугультинов С.Д. Обработка резанием металлов, применяемых в ракетостроении. – М.: МГТУ, 2008 – 196с.
2. Бурсний В.А. и др. Обработка нежестких деталей приборов. – Мн.: Мин-скгиппроект, 1998 – 232с.
3. Ивашин Э.Я. и др. Способ обработки лопаток турбин. А.с. 1000217 СССР, опубл. в Б.И., 1983, №8

УДК 621.9

Кочергин А.И., Ажар А.В., Ратько Е.Ф.

АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ И ХАРАКТЕРА ПОВРЕЖДЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ В КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЯХ

*Белорусский национальный технический университет
 Минск, Беларусь*

Исследование причин выхода из строя, характера повреждения, рассеивания величин износа сборных комбинированных осевых инструментов является одним из этапов комплексной работы по изучению и установлению критериев отказа многоэлементных сборных режущих инструментов в производственных условиях с учетом стохастического характера процесса обработки и организации инструментообеспечения [1, 2, 3].

Высокая стоимость комбинированных осевых инструментов требует принимать такой критерий смены, который позволил бы максимально использовать их ресурс в конкретных производственных условиях. Применять общепринятый критерий - заданную величину допустимого износа, в данном случае не представляется возможным, так как:

- режущие кромки, участвующие одновременно или последовательно в процессе резания, в разной степени влияют на общую стойкость инструмента, из-за разной величины сечения среза и режимов резания для различных ступеней;

- разброс механических свойств материала заготовок, состояния поверхностного слоя, припуска на обработку, качества пластин и параметров точности их установки в гнезда корпуса инструмента, переменные жесткость технологической системы и режимы резания приводят к разбросу величин износа граней либо поломке отдельных режущих пластин.

- на производстве в качестве причины смены инструмента часто используются как технологические критерии, например, допустимая погрешность обработки, так и условные показатели (в том числе и субъективные): характерный шум, вибрации станка, замена других инструментов наладки, перерыв на обед.

В данной работе выполнен анализ работоспособности комбинированных инструментов с СНП (сменными неперетачиваемыми пластинами) при обработке отверстий в корпусных деталях из серого чугуна в производственных условиях.

При этом необходимо было решить следующие задачи:

- проанализировать существующие конструкции комбинированных инструментов с СНП, применяемых для обработки отверстий;

- установить причины замены и исследовать состояние режущих кромок комбинированных инструментов в производственных условиях в момент съема со станка;

- определить критерий смены режущих пластин.

Исследование принципов замены и анализ состояния режущих граней многоступенчатых осевых инструментов с СНП проводились на Минском тракторном заводе, в механическом цеху №1, на участке механообработки "Корпуса" № 80- 1701025-А и муфты №80-1701025-В (рис.1).

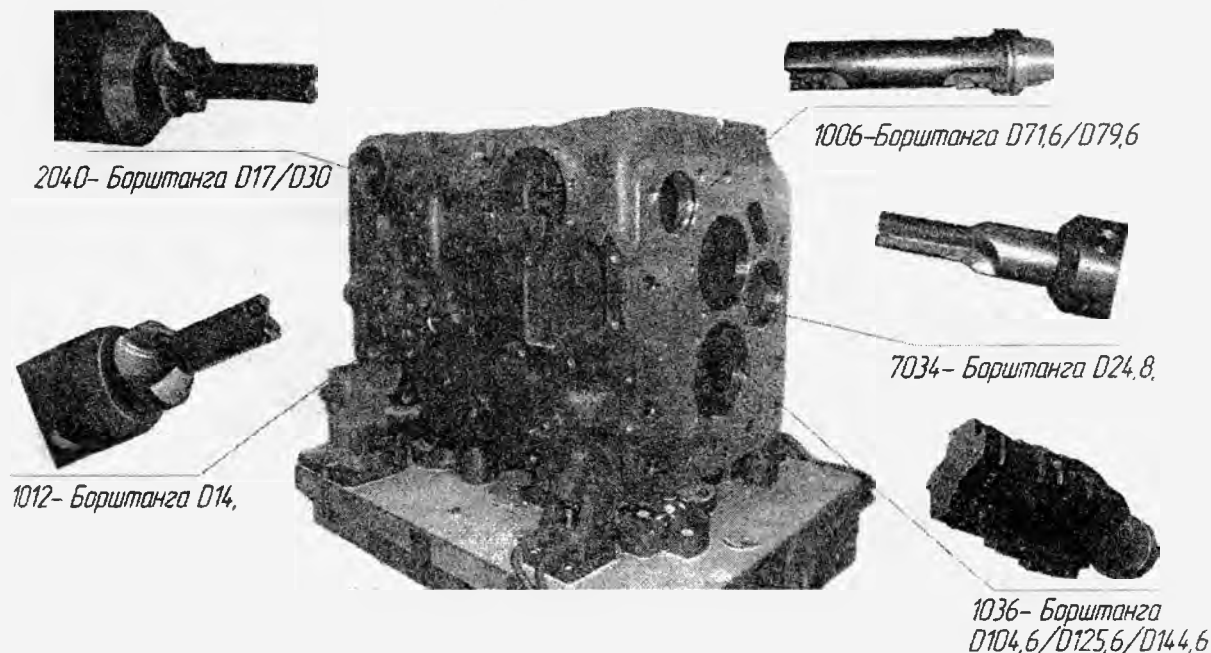


Рис. 1. Объекты исследования

Материал обрабатываемых деталей – серый чугун СЧ25 ГОСТ 1412-85; 170...240 НВ.
Станок – SAS TCF 2.6.

В результате анализа технологического процесса механообработки “Корпуса” в качестве исследуемых были рассмотрены переходы с использованием комбинированных борштанг фирмы ‘Walter’ [4].

Характеристики объекта исследования рассмотрим на примере обработки крепежного отверстия $\varnothing 14$ мм с фаской:

Инструмент: 1012- Борштанга D14, пластина LCMX 06T204-D57 WKP25 (рис. 1, 2);

Операция №20;

Количество граней - 4. Количество рабочих граней – 2;

Количество пластин на инструменте: $z=3$;

Режимы резания:

Подача: минутная $S_{мин} = 398$ мм/мин; оборотная $S_{об} = 0.07$ мм/об;

Длина резания $L_{рез} = 97,5$ мм;

Скорость резания $V = 250$ м/мин;

Частота вращения инструмента $n = 5687$ мин⁻¹;

Машинное время $T_m = 14,7$ сек;

Фактическая стойкость $T_{ст} = 5$ мин;

Щероховатость обработанной поверхности $R_a 3.2$.



Рис. 2. Виды повреждений пластин борштанга D14 при замене

Установлено, что основными причинами замены комбинированных инструментов являются:

- плановая замена после обработки заданного количества деталей;
- низкое качество обработанной поверхности;
- повышенная вибрация инструмента, сопровождаемая характерным шумом.

Характер повреждения режущих граней и их доля от общего количества отказавших пластин исследуемых комбинированных борштанг приведены на рис. 3 и в табл. 1.



Рис. 3. Диаграмма состояния режущих граней СНП LCMX 06T204-D57 WKP35 борштанги 1012 'Walter' в момент съема со станка. Операция 020. Обрабатываемая деталь 80-1701025-B

Таблица 1 – Виды повреждений режущих граней СНП в момент замены инструментов

Инструмент	Пластина	Характер повреждения граней	
		Износ по задней поверхности, %	Износ с выкрашиванием, %
2040 Борштанга	P28477-1 WKP25	90	10
1036 Борштанга	CCMT120408-PM5 WAK20	87	13
1006 Борштанга	CCMT120408-PM5 WAK20	89	11
7034 Борштанга	P28475-2 WKP35	92	8
1037 Микробор	WCGT040204-X5 WAK15	91	9

В результате анализа приведенных статистических данных установлено, что наиболее характерным видом повреждения режущих граней пластин в момент съема со станка является износ по задней поверхности (рис. 2, 4) [5, 6, 7]. Выкрашивание пластин происходит в основном из-за некачественного обрабатываемого материала.

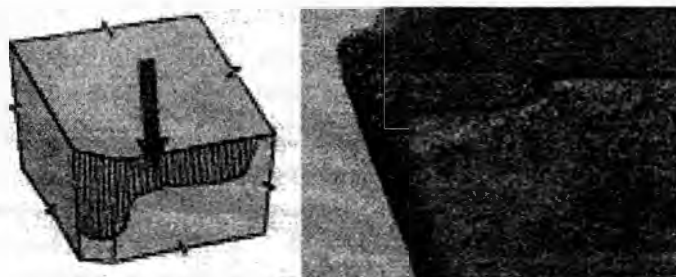


Рис. 4. Износ по задней поверхности

С целью сбора необходимых статистических данных и в дальнейшем определения количественного критерия отказа инструмента были произведены измерения износа СНП.

Используя линейную меру, износ по задней поверхности h_3 измеряется, как показано на рисунке 5 [8]. Благодаря простоте и оперативности такое измерение износа на производстве нашло наибольшее применение. Обычно измерение размера h_3 с достаточной степенью точности производится лупой, оснащенной шкалой. Измерение величины h_3 может производиться в

любой точке лезвия режущей кромки, но чаще на участках с равновеликим износом вдоль лезвий или, же в местах наибольшего износа $h_{3 \max}$ (рис.5).

В нашем случае измерения выполнялись при помощи лупы Бринелля со шкалой, имеющей цену деления 0,05 мм по приведенным выше рекомендациям.

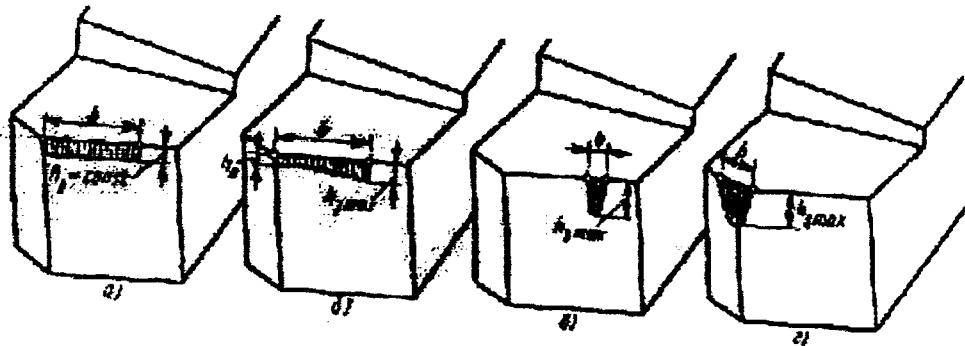


Рис. 5. Схемы измерения визуально наблюдаемых признаков износа лезвий:
а - равномерный износ по задней поверхности; б - неравномерный износ по задней поверхности;
в - местный износ задней поверхности; з - износ вершины резца на задней поверхности

В результате математической обработке экспериментальных данных были построены гистограммы распределения износа (рис.6) и определены величины среднего износа пластин по задней поверхности (табл. 2) [9, 10].

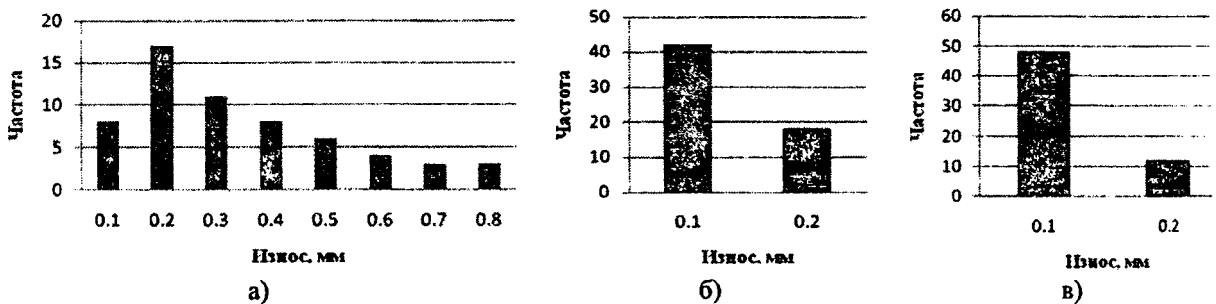


Рис. 6. Распределение износа пластин борштанги D14 мм:
а) периферийная пластина первой ступени; б) центральная пластина первой ступени; в) фасочная пластина второй ступени

Таблица 2 – Величины среднего износа СНП комбинированных борштанг

Инструмент	Пластина	Средний износ по задней поверхности $h_{\text{ср.зад.}}$, мм		
		периферийная пластина (1-ая ступень)	центральная пластина (1-ая ступень)	фасочная пластина (2-ая ступень)
1012 Борштанга D14 мм	LCMX 06T204-D57 WKP25	0,45	0,15	0,13
7034 Борштанга D24,8 мм	P28475-2 WKP35	0,39	0,17	0,15

Из гистограммы распределения износа периферийных пластин по задней поверхности (рис. 6 а) следует, что эмпирическое распределение износа в первом приближении может быть аппроксимировано нормальным законом распределения случайных величин [10, 11]. Таким образом, средний износ по задней поверхности может являться объективным количественным критерием отказа комбинированного инструмента.

Выявлена разница величин среднего износа СНП, расположенных на разных ступенях комбинированного инструмента (табл. 2). Наибольшему износу подвержены пластины с наибольшим сечением среза и длиной пути резания обрабатываемой ступени. Пластины, распо-

женные на одной ступени, но разных диаметрах также подвержены разному износу. Большему износу подвержены пластины, расположенные на больших диаметрах инструмента и соответственно имеющие большую окружную скорость при резании. Смена всех пластин инструмента регламентируется отказом наиболее нагруженной, что приводит к недоиспользованию ресурса остальных.

В рассмотренных примерах, при обработке крепежных отверстий комбинированными борштангами, лимитирующей является периферийная пластина 1-ой ступени. Центральные и фасочные пластины подвержены меньшему износу (рис. 6 б, в, табл. 2), что свидетельствует о не полном использовании их режущих способностей при замене.

Выводы:

- На производстве основным критерием замены комбинированных осевых инструментов является технологический - регламентированная замена через определенное количество деталей.

- Анализ состояния режущих пластин показал, что основной вид отказа при замене комбинированного инструмента - износ по задней поверхности. Наибольшее его значение наблюдается на периферийной пластине первой ступени, что связано с наиболее нагруженными условиями ее работы.

- Выявлен разброс значений износа в момент замены инструмента, что связано в первую очередь с разбросом механических свойств и качества поверхности материала заготовок, а также с возможностью нерегламентированной замены инструмента.

- Средний износ по задней поверхности может являться объективным количественным критерием отказа комбинированного инструмента.

- Величина среднего износа наиболее нагруженной пластины составляет $\approx 50\%$ от допустимой величины, что является запасом для назначения нового регламента замены инструмента [12].

- Обеспечить повышение ресурса сборного комбинированного инструмента можно несколькими путями: конструкторскими, технологическими, организационно-техническими. Так при выявлении лимитирующей пластины на этапе проектирования можно использовать более прочный и износостойкий сплав, выбрать по возможности пластину большего габарита, с большим углом при вершине и числом режущих граней. На этапе технологической подготовки производства требуемого результата можно достичь за счет назначения оптимальных режимов резания на каждой ступени инструмента. При организации плановой замены необходимо назначать такой регламент, который обеспечивал бы достижение допустимой величины износа с учетом возможного разброса его значений, а также применять стратегию отдельной замены пластин с учетом кратности их использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ажар А.В., Грошева А.И., Ермоленко А.А. Исследование состояния рабочих граней твердосплавных пластин торцовых фрез на производстве в момент съема со станка // *Машиностроение*. – Мн., 2005. – Вып. 21. – С.49-54.
 2. Ажар А.В., Дечко Э.М., Кочергин А.И., Ермоленко А.А. Исследование работоспособности червячных модульных фрез в производственных условиях // *Машиностроение*. – Мн., 2006. – Вып. 22. – С. 58-62.
 3. Ажар А.В., Ермакович И.В., Ратько Е.Ф. Исследование параметров работоспособности высокопроизводительных сборных торцовых фрез диаметром 125 и 160 мм при обработке корпусных деталей трактора МТЗ на станках с ЧПУ // *Машиностроение*. – Мн., 2009. Вып. 25. – С. 262-270.
 4. Каталог режущих инструментов фирмы WALTER 2002-2003.
 5. Ящерицын П.И. Теория резания: учеб./ П.И. Ящерицын, Е.Э Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Мн.: Новое знание, 2005. – 512с., ил. 6. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1966. – 264с.
 7. Хае Г.Л. Прочность режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1975. – 168 с., ил. 8. Башков В.М., Кацев П.Г. Испытание режущего инструмента на стойкость. – М.: Машиностроение, 1985. – 136с.
 9. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
 10. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности – М.: издательство «Советское радио», 1962. – 552 с.
 11. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1973. – 368 с., ил.
 12. Волович В.А. Нормирование расхода режущего инструмента в машиностроении: Справочник/ В.А. Волович, А.Ф. Керженцев, И.Г. Филатов.- Мн.: Беларусь, 1989.- 176с.
- УДК 621.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ЗАМЕНЫ КОМБИНИРОВАННЫХ ОСЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Данная работа является продолжением исследований работоспособности сборных комбинированных осевых инструментов для обработки отверстий в корпусных деталях из серого чугуна на Минском тракторном заводе. По результатам исследований было установлено, что количественным показателем отказа сменных неперетачиваемых пластин (СНП) комбинированных борштанг является величина износа по задней поверхности. В связи с этим, встает задача оценки величины и определения закона распределения износа с целью применения данного показателя в качестве количественного критерия отказа инструмента в производственных условиях.

Для статистической обработки результатов измерений износа пластин разработан алгоритм (рис.1) и на его основе программное обеспечение для определения теоретического закона распределения величины износа.

Были рассмотрены четыре теоретических закона распределения случайной величины: нормальный, логонормальный, экспоненциальный и закон Вейбулла [1-6]. Им в соответствие поставлены эмпирические распределения, полученные в результате статистической обработки результатов измерения износа СНП комбинированных борштанг, используемых на участке механообработки "Корпуса" № 80- 1701025-А и муфты №80-1701025-В [1, 2]. Проверка гипотезы согласия эмпирического и теоретического закона распределения случайной величины проводилась с помощью критерия Колмогорова λ [1-3, 7]. Этот критерий является одним из наиболее применяемых для установления закона распределения генеральной совокупности по большой выборке из нее. Критерий λ дает достаточно точные результаты даже при объеме выборок, состоящих из нескольких десятков членов и прост для вычисления.

В нашем случае выбор этого критерия вполне обоснован, т.к. объем выборок составил 120 исследуемых пластин на каждой ступени инструмента. Не вдаваясь в теоретические подробности обоснования критерия Колмогорова, приведем результаты проверки согласия эмпирических распределений износа пластин комбинированных осевых инструментов различным теоретическим законам (табл. 1). Данные получены при помощи программного обеспечения разработанного в среде программирования MathCAD.

Примеры графиков плотности вероятности и функции распределения износа пластин сборных борштанг фирмы Walter представлены на рис. 2. Графики сравнения функций эмпирического и теоретических распределений износа режущих граней по выбранным законам приведены на рис. 3.

В ходе анализа полученных результатов было установлено, что величины износа имеют большой разброс значений.

Анализ полученных зависимостей показал, что рассеивание износа режущих инструментов, таких как комбинированные осевые инструменты для обработки отверстий, по задней поверхности в момент съема со станка, наилучшим образом описывается нормальным и законом Вейбулла. При этом только при нормальном законе распределения износа критерий $\lambda=1.28...1.33$ имеет доверительную вероятность $p=0.9...0.95$, т.е. $1-p=0.05...0.1$ [1-3, 7]. Это означает, что мала вероятность такого случайного отклонения эмпирической функции распределения от теоретической, которая наблюдалось при опыте. Иначе говоря, наблюдаемое отклонение $F_2(h)$ от $F_1(h)$, по-видимому, не случайно, т. е. что функция $F_2(h)$ недостаточно хорошо согласуется с $F_1(h)$. Для других теоретических законов критерий λ недопустимо велик. При анализе графиков распределения износа пластин (рис.2) видно, что наибольшая погрешность согласия эмпирического и теоретического закона соответствует области малых величин износа $h_3=0...0.1$ мм.

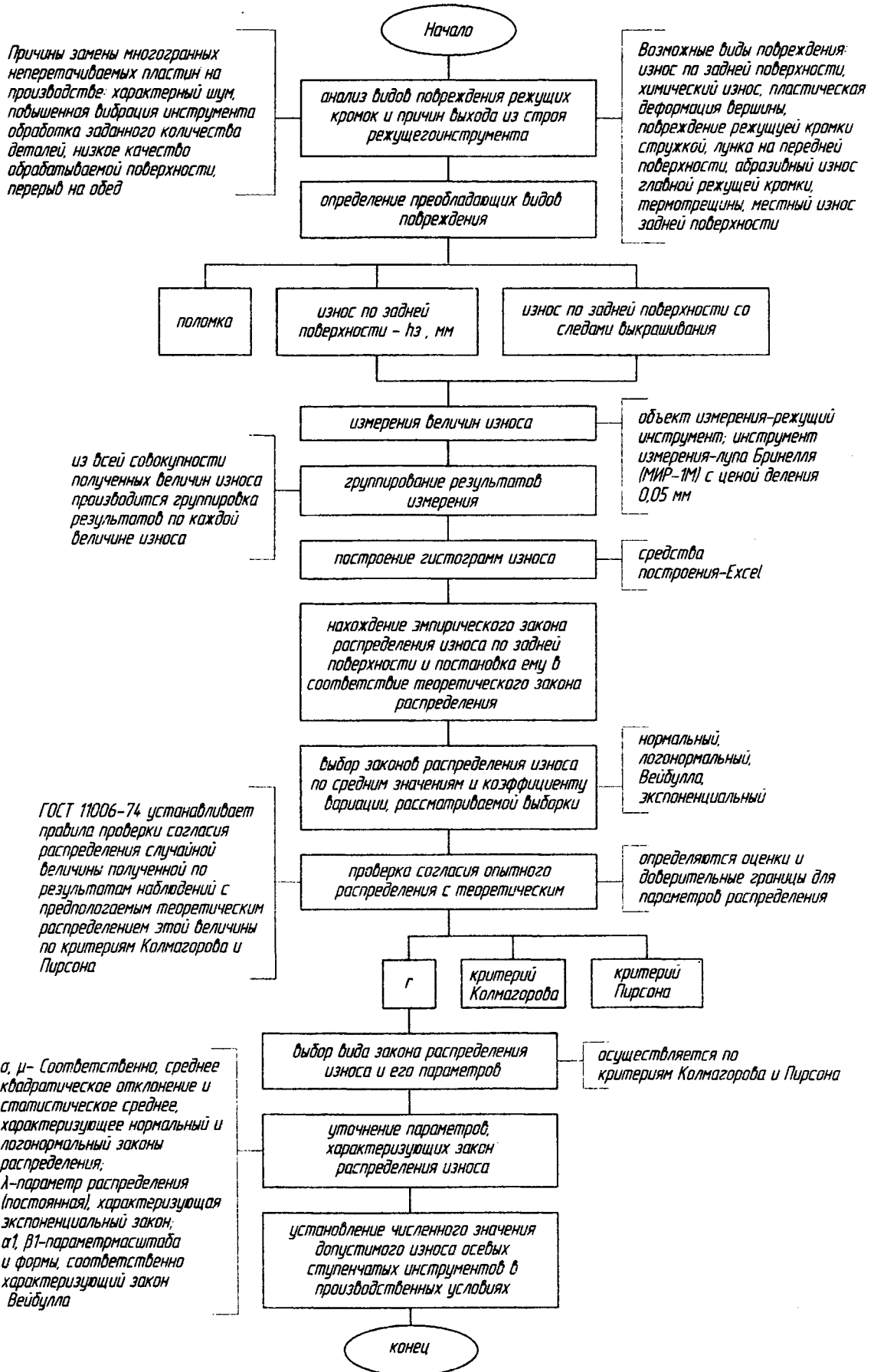


Рис. 1. Алгоритм прогнозирования износа комбинированных инструментов в производственных условиях

При усечении области исследуемых величин до указанного предела критерий согласия принимает значение $\lambda=0,71...0,77$, соответствующее $1-p=0,6...0,7$, что говорит о хорошем согласии эмпирического и теоретического нормального закона распределения износа.

Износ центральных и периферийных пластин подчиняется закону равномерного распределения

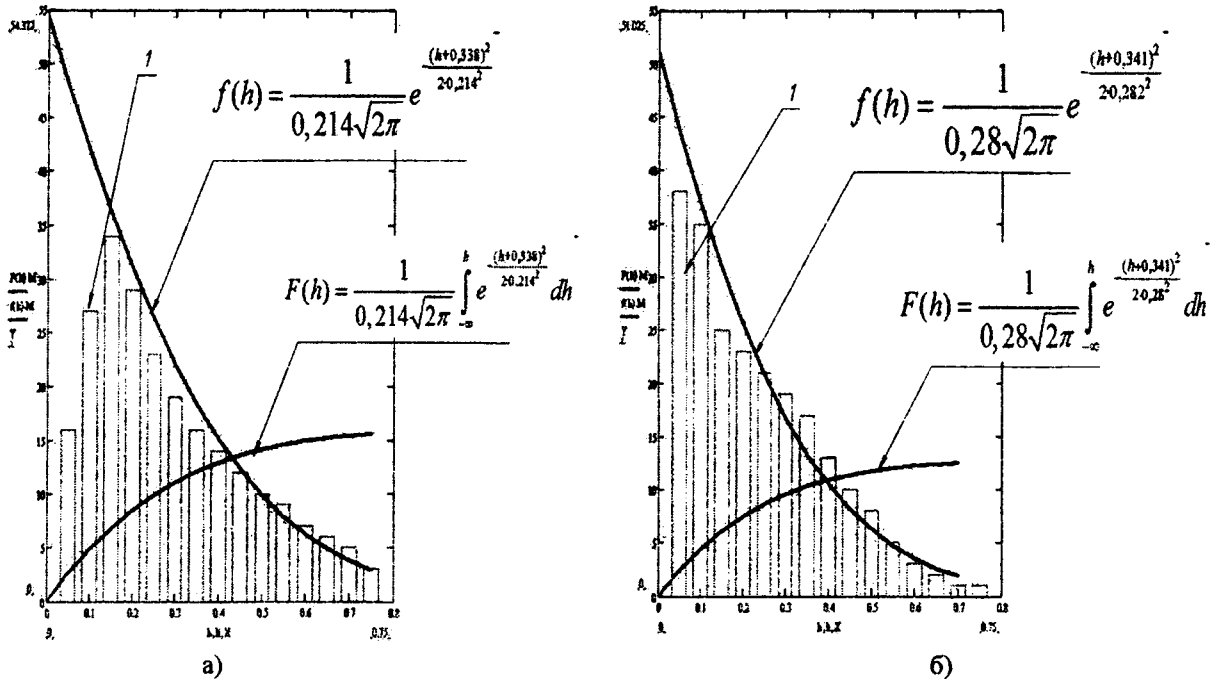


Рис. 2. Графики распределения износа периферийных пластин:
а) борштанга D14 мм; б) борштанга D24,8 мм;

1 - гистограмма распределения износа; $f(h)$ -кривая плотности теоретического распределения износа, подчиняющаяся нормальному закону; $F(h)$ - функция распределения износа

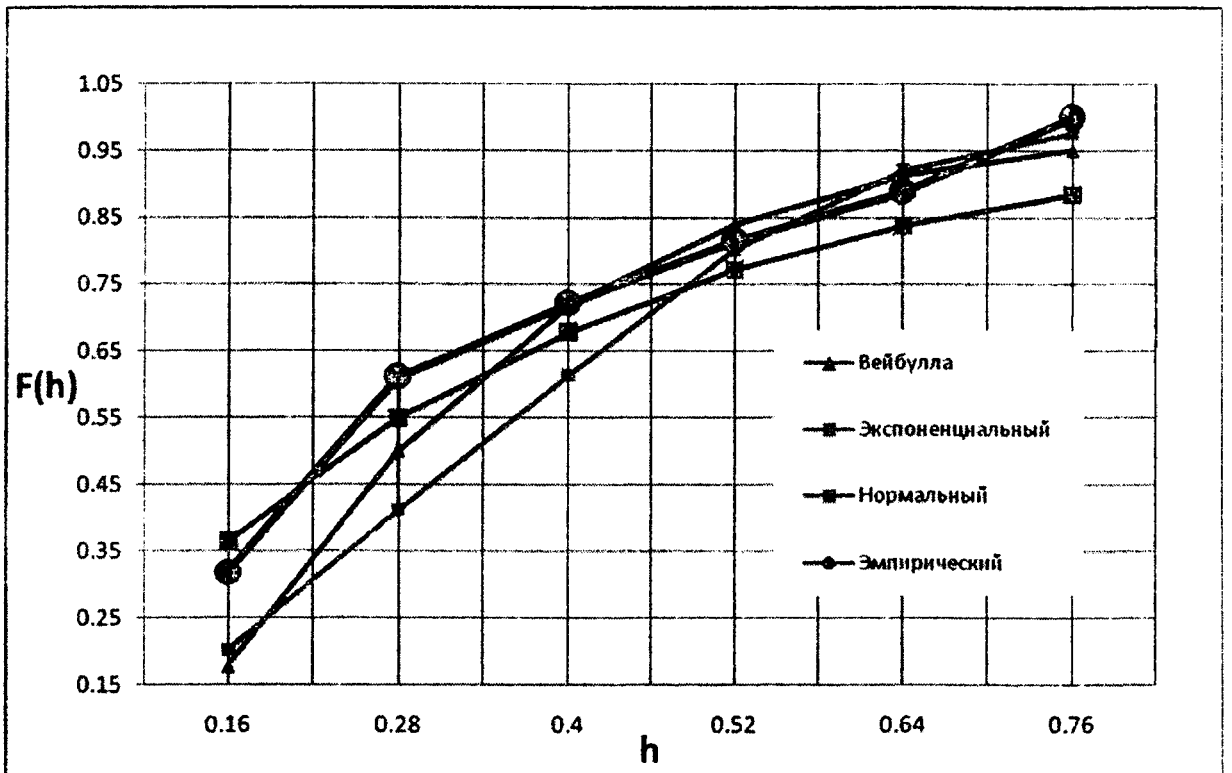


Рис. 3. Сводный график функций распределения износа периферийных пластин борштанг D14 мм

Закон распределения	Борштанга D14 мм		Борштанга D24,8 мм	
	Основные уравнения	Критерий Колмогорова	Основные уравнения	Критерий Колмогорова
Нормальный	$f(h) = \frac{1}{0,214\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(h-0,338)^2}{2 \cdot 0,214^2}}$ $F(h) = \frac{1}{0,214\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^h e^{-\frac{(h-0,338)^2}{2 \cdot 0,214^2}} dh$	$\lambda = 1,31$	$f(h) = \frac{1}{0,28\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(h-0,341)^2}{2 \cdot 0,28^2}}$ $F(h) = \frac{1}{0,28\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^h e^{-\frac{(h-0,341)^2}{2 \cdot 0,28^2}} dh$	$\lambda = 1,28$
Экспоненциальный	$f(h) = 2,842e^{-2,842h}$ $F(h) = 1 - e^{-2,842h}$	$\lambda = 9,21$	$f(h) = 2,921e^{-2,921h}$ $F(h) = 1 - e^{-2,921h}$	$\lambda = 8,9$
Логонормальный	$f(h) = \frac{0,4343}{h \cdot 0,264\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg h + 0,553)^2}{2 \cdot 0,264^2}}$ $F(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\log(h)+0,553}{0,264}} e^{-\frac{(h)^2}{2}} dh$	$\lambda = 4,28$	$f(h) = \frac{0,4343}{h \cdot 0,245\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg h + 0,562)^2}{2 \cdot 0,245^2}}$ $F(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\log(h)+0,562}{0,245}} e^{-\frac{(h)^2}{2}} dh$	$\lambda = 4,62$
Вейбулла	$f(h) = \frac{2,013}{0,147} h^{2,013-1} \cdot e^{-\frac{h^{2,013}}{0,147}}$ $F(h) = 1 - e^{-\frac{h^{2,013}}{0,147}}$	$\lambda = 3,61$	$f(h) = \frac{2,121}{0,129} h^{2,121-1} \cdot e^{-\frac{h^{2,121}}{0,129}}$ $F(h) = 1 - e^{-\frac{h^{2,121}}{0,129}}$	$\lambda = 3,05$

Выводы:

Теоретические предположения о разной степени износа пластин комбинированных осевых инструментов нашли подтверждение при производственных исследованиях работоспособности. У ступенчатых борштанг наибольшему износу подвержены пластины, лимитирующие по скорости и длине резания. Смена инструмента осуществляется при износе периферийных пластин.

Распределение износа СНП лучшим образом аппроксимируется нормальным законом и законом Вейбулла, что дает возможность использовать величину среднего износа из статистической выборки измерений в качестве количественного критерия затупления инструмента.

Распределение износов центральных и фасочных пластин носит равномерный характер в пределах 0,2..0,3 мм, что соответствует схеме частичного нагружения этих конструктивных элементов инструмента.

Таким образом, результаты работы могут быть использованы для определения и прогнозирования стойкости, нормирования расхода сборных комбинированных инструментов при проведении научных исследований, производственных испытаний и непосредственно при эксплуатации, а также могут быть использованы при разработке мероприятий направленных на увеличение надежности инструментов на этапах подготовки производства.

Разработанный алгоритм и программное обеспечение в среде программирования MathCAD для обработки статистических данных по анализу состояния и измерения износа на производстве могут быть использованы для создания автоматизированной экспертной системы управления процессом механической обработки различными типами режущих инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Шторм. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. Перевод с немецкого Н. Н. и М. Г. Федоровых под редакцией Н. С. Райбмана - М.: Издательство «Мир», 1970. – 368 с. 2. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности – М.: Издательство «Советское радио», 1962. – 552 с. 3. Я.Б. Шор, Ф.И. Кузьмин. Таблицы для анализа и контроля надежности. - М.: Изд-во «Советское радио», 1968. - 288 с. 4. ГОСТ 11.004-74. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения. - Введ. 21.02.1974.– М.: Госстандарт СССР, 1974. – 20 с. 5. ГОСТ 11.005-74. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров экспоненциального распределения. – Введ. 08.07.1974.– М.: ВНИИС: Всесоюзный научно-исследовательский институт стандартизации, 1974. – 30 с. 6. ГОСТ 11.007-75. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров распределения Вейбулла. – Введ. 05.09.1975.– М.: Госстандарт СССР, 1975. – 30 с. 7. ГОСТ 11.006-74. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. – Введ. 20.12.1974. – М. ВНИИС: Всесоюзный научно-исследовательский институт стандартизации, 1974. – 24 с.

УДК 621.9.048.4

Луговой И. В.

ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Обработка отверстий малого диаметра в глубоких каналах, криволинейных отверстий и отверстий со сложным поперечным профилем в хрупких твердых и сверхтвердых материалах, представляет определенные трудности. Для этих целей используют различные методы, например, обработку длинномерных каналов осуществляют воздушным потоком абразивных частиц. Другие широко известные методы обработки отверстий малого диаметра в металлах основаны в основном на использовании электрохимических и электрофизических методов [1]. В частности, к этим методам можно отнести электроэрозионную обработку криволинейным электрод-инструментом в металлах, лазерную обработку отверстий малого диаметра в различных материалах, электрохимическую обработку сложных поверхностей и т.д. Несмотря на многочисленность известных методов, одной из сложных технических задач на сегодня считается получение и обработка отверстий малого диаметра в неэлектропроводных хрупких материалах: стекле, камне, кости, керамике, ферритах, фарфоре и пр. Возможное решение поставленной задачи может быть при использовании виброударных ультразвуковых систем [2]. Так, например, известно устройство для ультразвукового полирования (рис.1), содержащее составной волновод, выполненный в виде цилиндра, длиной равной четверти длины волны, и спирали с углом подъема винтовой линии $50-80^\circ$ [3].

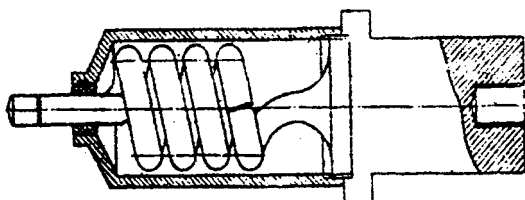


Рис. 1. Устройство для ультразвукового полирования

Процесс обработки с ультразвуком происходит за счет высокочастотных ударов торца рабочего инструмента по абразивным зернам и сопровождаемыми при этом сколами частиц обрабатываемого материала. В общем случае механизм ультразвуковой обработки можно представить как многоэтапный процесс, состоящий из образования микротрещин и выколов при ударе инструмента по частицам абразива, перемещения выколотых частиц обрабатываемого материала и разрушения абразивных частиц под действием

ультразвуковых колебаний, подачи и удаления отработанного абразива и снятого материала. Сложность получения глубоких отверстий усугубляется тем, что при их обработке длиной более пяти диаметров резко снижается эффективность действия ультразвука. Дальнейшее поддержание процесса достигается либо повышением интенсивности ультразвука, либо использованием дополнительных устройств для стабилизации амплитуды колебаний. Таким образом можно заключить, что поиск новых методов получения глубоких отверстий малого диаметра является весьма актуальной задачей в различных областях техники.

В настоящей работе рассматривается новый метод обработки, основанный на повышении амплитуды колебаний рабочего инструмента путем передачи высокочастотных колебаний через промежуточные волноводы-концентраторы с переменной жесткостью. Использование промежуточных элементов с переменной жесткостью позволяет получать высокочастотные продольные и низкочастотные изгибные колебания большой амплитуды, т.е. достигается возможность осуществить модуляцию высокочастотных продольных колебаний рабочего инструмента. Полученные комбинированные колебания рабочего инструмента позволяют обеспечить постоянное обновление абразивных частиц в зоне взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью, повысить производительность и качество процесса обработки отверстий. Достоинством предложенного метода является возможность применения комбинированных высокочастотных колебаний для прошивки отверстий в хрупких материалах без вращения инструмента для образования как сквозных, так и глухих отверстий различной конфигурации и размеров. Рабочим инструментом для этого служит специальный инструмент или проволока из малоуглеродистой стали, выполненные в соответствии с формой поперечного сечения желаемого отверстия. Источником ультразвуковых колебаний служит пьезокерамический преобразователь с рабочей частотой 25 кГц. Предложенная схема обработки позволяет варьировать длиной и диаметром рабочего инструмента, длиной рабочей части до места его крепления к узлу подачи с целью достижения оптимальных параметров.

Экспериментальная установка для реализации предлагаемого метода обработки представлена на рисунке 1. Она состоит из стойки с основанием, на котором размещен столик с механизмом вертикальной подачи заготовки с заданным усилием прижима к рабочему торцу инструмента. Стойка снабжена цанговым механизмом для фиксации положения проволоки-инструмента, в которой возбуждаются как продольные так и изгибные колебания. От величины угла закручивания промежуточной части инструмента между точками его крепления к концентратору А и зажимной цангой Б зависят величины составляющих от изгибных и продольных колебаний.

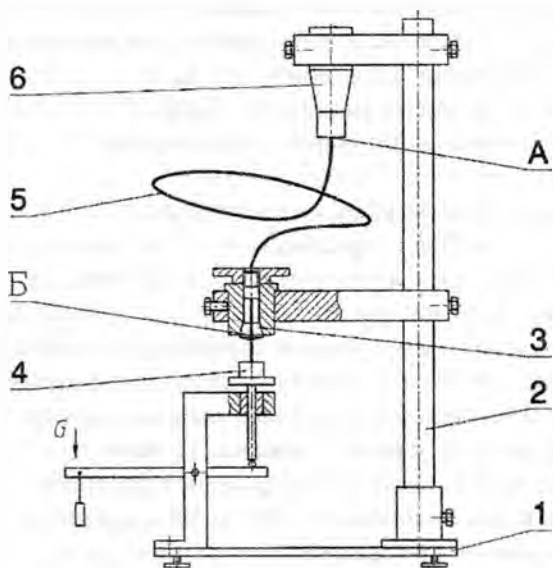


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:
1 – столик; 2 – стойка; 3 – цанга; 4 – образец (камень);
5 – инструмент - проволока ($S=1 \text{ мм}^2$); 6 – ультразвуковой преобразователь

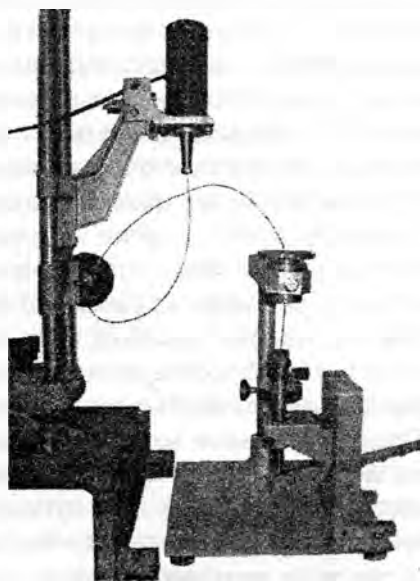


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

Предварительные исследования предлагаемого метода обработки дали положительные результаты и показали эффективность такого метода введения ультразвука при прошивке и доводке отверстий малого диаметра в образцах из поделочных камней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марков А.И., Бекренев Н.В. // Ультразвуковая доводка отверстий алмазным инструментом // Прогрессивные технологические процессы и оборудование ЭФХК обработки. – М: Общественное знание. – 1989. – С. 88-93. 2. Артемьев В.В., Клубович В.В., Сакевич В.Н. // Ультразвуковые виброударные процессы. – Мн.: БНТУ, 2004. – С.258. 3. А. с 854685 (СССР) Устройство для ультразвукового полирования / Зимовец В.Ф., Герасемчук П.М., Стручков С.Н., Вуйцик С.Д // Бил. изобр. – 1981. – №30. – С.2.

УДК 621.793

Спиридонов Н.В., Кобяков О.С, Адаменко Д.В.

К ВОПРОСУ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Повышение надежности сельскохозяйственной техники является одной из важнейших задач, стоящих перед машиностроителями. Это касается повышения долговечности ответственных узлов трения тормозных систем, механизмов сцепления и др., от которых зависит в первую очередь ресурс и безопасность машин.

Работа таких механизмов характеризуется большим разнообразием одновременно действующих эксплуатационных параметров, таких как: скорость относительного скольжения, удельные силовые нагрузки, температурный режим, условия смазки, наличие абразивной среды.

Для упрочнения деталей узлов трения сельскохозяйственной техники: тракторов, комбайнов и др., в настоящее время применяют широко методы термической и химико-термической обработки с использованием объемного нагрева. В том числе и для деталей, где требуется повышение прочностных свойств небольших участков. Это вызывает нежелательные структурные изменения основы деталей, повышенные внутренние напряжения и деформации и в конце концов излишние материальные затраты. Типичным представителем таких деталей является корпус тормозной системы, изготавливаемый из высокопрочного чугуна ВЧ50. В нем изнашиванию с ударными нагрузками подвергаются небольшие участки внутренней полости упоры, взаимодействующие с тормозными дисками.

Для них наиболее целесообразно применение для упрочнения источников, имеющих высокую концентрацию энергии на малой площади. Наиболее приемлемым источником энергии как по плотности мощности, так и по способу доставки (внутренняя труднодоступная полость корпуса ограниченных размеров) является лазерный луч.

Как показывает практика, динамика взаимодействия элементов тормозной системы, а соответственно, надёжность работы зависит прежде всего от триботехнических свойств материалов пар трения, а так же от нагрузочно-скоростных и температурно-силовых условий контакта.

Продолжительное воздействие силовых нагрузок в режиме торможения приводит к накоплению дефектов структуры, образованию субмикротрещин, микротрещин и изнашиванию поверхностного слоя упоров. Для чугуна ВЧ50, как и для большинства чугунов с шаровидными включениями графита характерна чётко выраженная декогезия разрушения глобул графита и основы в процессе изнашивания. Графитовые глобулы служат концентраторами напряжений и являются первопричиной разрушения поверхностного слоя. Чугуны можно рассматривать как структурно-неоднородные материалы, содержащие включения графита, случайно распределённые в металлической матрице и имеющие чёткие границы раздела фаз.

Использование традиционных методов термоупрочнения (объемная закалка, закалка ТВЧ) не обеспечивает должного эффекта по прочностным и износостойким свойствам создаёт дополнительные проблемы при последующей механической обработке упрочнённых деталей из высокопрочного чугуна марки ВЧ50.

Лазерное термоупрочнение деталей из чугуна представляет большой практический интерес в связи с широким использованием чугуна в сельскохозяйственном машиностроении. Кроме того, локальность лазерной термообработки поверхности упоров без объёмного нагрева всей массы детали делает данный метод наиболее выгодным при термоупрочнении такого класса деталей.

При лазерной закалке в условиях высокоскоростного нагрева и охлаждения ограниченного по площади участка упрочняемой поверхности формируется структура, состоящая в основном из игольчатого мартенсита и остаточного аустенита, обладающая высокими прочностными и износостойкими свойствами. В зоне воздействия непрерывного лазерного излучения происходит упрочнение поверхностного слоя вследствие фазовых превращений (аустенитно-мартенситных), приводящих к образованию метастабильных структур. При лазерном термоупрочнении из твердого состояния (плотность мощности $10^3 - 10^4$ Вт/см²) главную роль играют теплопроводность и массоперенос, определяющие необходимое время лазерного воздействия для фазовых превращений. При лазерном термоупрочнении из жидкого состояния (плотность мощности $10^5 - 10^7$ Вт/см²) решающую роль играет конвекция расплава, которая совместно с массопереносом определяет неравновесную микроструктуру и химический состав затвердевающего слоя. Испарение материала и газодинамические эффекты становятся доминирующими при плотности мощности, превышающей 10^7 Вт/см².

Температурный интервал закалки чугунов от твердой к жидкой фазе достаточно узок, поскольку аустенизация перлита заканчивается при температуре 1000°C , а уже при температуре 1150°C происходит закалка из жидкой фазы. Анализ микроструктуры зон термоупрочнения показывает, что микроструктура металла формируется из очень мелких дендритов или ячеек аустенита, не превышающих несколько мкм, с включениями игольчатого мартенсита. В междендритных промежутках располагается двухфазная структура, состоящая из ледебурита и цемента. Наличие этой фазы и мартенситной структуры обеспечивают высокую твердость и износостойкость металла.

Сложность процессов лазерного термоупрочнения, их количественная оценка определяется, прежде всего, технологическими свойствами металла, его фазовыми и структурными характеристиками, энергетическими параметрами лазерного луча, а также технологическими факторами термообработки. Лазерное термоупрочнение чугунов, прежде всего, связано с получением структур, соответствующих «отбеленному чугуну». Формирование подобных структур возможно в условиях проплавления поверхности при достаточно высоких (не менее 10^2 C/c) скоростях нагрева и охлаждения (до 10^3 C/c), способствующих фазовым и структурным превращениям. В процессе закалки с оплавлением формируются две зоны. Одна из зон, полученная из расплава, при кристаллизации состоит из мелких дендритов аустенита. Междендритное пространство заполнено мелкодисперсной ледебуритной составляющей. Вторая зона имеет структуру, состоящую из мелкоигольчатого мартенсита, остаточного аустенита и графита. Между зонами нет четкой границы.

Для получения значительного экономического эффекта большой практический интерес представляет замена достаточно дорогого и труднообрабатываемого чугуна ВЧ-50 на более дешевый и легкообрабатываемый серый чугун марки СЧ-20 или СЧ-30, учитывая при этом большую массу корпуса тормозной системы (32 кг). Микроструктура серого чугуна СЧ-20 после лазерного термоупрочнения более однородна и формируется из зоны полностью «отбеленного» металла и зоны закалки из твердой фазы.

Использование современных диодных и волоконных лазеров с длиной волны 0,8; 0,9; 1,07 мкм, обладающих высокой поглощательной способностью (в 5-6 раз больше, чем у CO_2 лазеров с длиной волны 10,6 мкм), высоким КПД и удобной транспортировкой луча, позволяет более эффективно использовать лазерный нагрев для термоупрочнения.

ПОРИСТЫЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ОЧИСТКИ И ОСУШКИ ГАЗОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Белорусский национальный технический университет¹, Государственное научное учреждение
«Институт порошковой металлургии»²
Минск, Беларусь*

Введение. Одним из перспективных направлений применения пористых порошковых материалов (ППМ), определяемых их высокими капиллярными и фильтрующими свойствами, является очистка сжатых газов, воздуха от влаги, капель воды и механических примесей. Особенно остро стоит вопрос очистки и осушки сжатых газов в условиях эксплуатации пневмосистем при отрицательных температурах. Это, в первую очередь, относится к системам привода шаровых кранов для очистки и осушки природного газа на приборах автоматики компрессорных станций и газопроводов, которые работают при температуре природного газа от минус 60 до плюс 60 °С, а также к системам пневмопривода тормозов автомобилей, эксплуатируемых в зимний период, в районах Крайнего Севера.

Наибольшее распространение для очистки и осушки газов при отрицательных температурах получили абсорбционные осушители [1], которые используют жидкие абсорбенты для поглощения влаги из потока газа. Жидкие абсорбенты, применяемые для осушки природных и попутных нефтяных газов, должны иметь высокую растворимость в воде, низкую стоимость, хорошую коррозионную стойкость, стабильность по отношению к газовым компонентам и при регенерации; простоту регенерации, малую вязкость и т.д. Большинству этих требований наилучшим образом отвечают диэтиленгликоль (ДЭГ) и триэтиленгликоль (ТЭГ) и в меньшей степени этиленгликоль (ЭГ), этиловый спирт [2-4].

Целью настоящей работы является разработка пористого материала и устройства на его основе для глубокой очистки и осушки газов при отрицательных температурах.

Результаты работы и их обсуждение. Основными характеристиками фильтрующих материалов, применяемых для очистки и осушки сжатых газов, являются: размер пор, который обеспечивает необходимую тонкость очистки; коэффициент проницаемости, который характеризует производительность, и капиллярные свойства (краевой угол смачивания θ), от которых зависит эффективность влагоотделения.

Для разработки высокоэффективных материалов фильтроэлементов для очистки и осушки газов необходимо изучить взаимосвязь структурных и капиллярных свойств этих материалов с их эксплуатационными свойствами.

В качестве материала для исследований были выбраны следующие металлические порошки: титан марки ПТХ-2-1, медь марки ПМС, никель марки ПНЭ, сталь марки 12Х18Н10Т, бронза марки БрОФ-10-1, а также полимерные порошки: полиамид ПА-6, полипропилен, полиэтилен ПЭВД 1083-020, 15803-020, фторопласт Ф 4.

Экспериментальные исследования показали, что ППМ на основе титана из всех металлов имеют наиболее высокую смачиваемость при отрицательных температурах (косинус краевого угла смачивания равен 1). Наименьшую смачиваемость спиртом имеют материалы из порошка фторопласта, или по-другому, политетрафторэтилена (ПТФЭ) ($\cos \theta = 0,3$ на спирту и $0,2$ на спирту с добавлением 60 % H₂O), а среди металлических – ППМ из порошка бронзы марки БрОФ-10-1.

Проведены исследования влияния размеров пор пористого материала на степень очистки влаги из сжатого воздуха, выражаемую отношением разности концентрации влаги до и после фильтра. Степень очистки определяли по ГОСТ 17433-80 с помощью гигрометра «Байкал 5Ц», определяющего объемную долю влаги в сжатом воздухе до и после фильтра. Результаты исследований представлены на рис. 1.

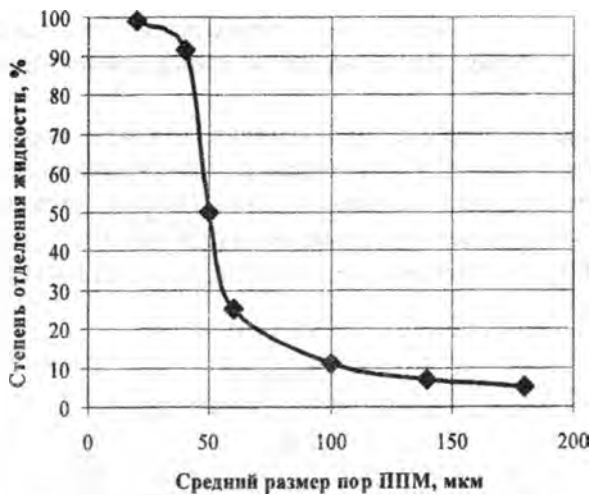


Рис. 1. Влияние размеров пор ППМ из порошка бронзы марки БрОФ-10-1 на степень отделения влаги из сжатого воздуха

Видно, что для очистки сжатых газов от механических примесей и одновременного отделения влаги из жидкого абсорбента, наиболее эффективным является ППМ с размером пор 20-30 мкм. Среди металлических пористых материалов наиболее эффективным является ППМ из порошка бронзы, а среди полимерных – пористый материал из волокон ПТФЭ. Поэтому, в качестве фильтроэлемента для отделения рекомендован композиционный ППМ из порошка бронзы с нанесенным слоем пористого ПТФЭ. Внешний вид фильтрующего материала показан на рис. 2.

Пористый материал из волокон ПТФЭ обладает достаточно высокой проницаемостью (коэффициент проницаемости $>100 \cdot 10^{-13}$ м²). Размер пор материала 20–100 мкм, пористость 75–85 %. Плотность волокнутого материала составляет 300–400 кг/м³, удельная поверхность – около 4,9 м²/г. Толщину материала можно варьировать в пределах от 1,5 до 20 мм. По химическим и термическим свойствам он полностью соответствует компактному ПТФЭ. Пористый материал из ПТФЭ отличается гидрофобностью, лиофильностью, стойкостью к агрессивным жидкостям и газам, растворителям, высокой теплостойкостью.

Технологический процесс нанесения слоя ПТФЭ на пористую подложку из ППМ был разработан совместно со специалистами Института механики металлополимерных систем им. В.А. Белого (г. Гомель) и включает следующие стадии: подготовка сырья, размещение заготовки в вакуумной камере, ее вращение и нагрев, облучение сфокусированным излучением СО₂-лазера, откачка летучих продуктов разложения и их нейтрализация, сбор и извлечение волокнутого материала. При этом, попадая на подложку, расположенную нормально к газовому потоку, волокна, сплавляясь между собой, образуют волокнутовый слой с пористостью 75–85 %. Слой волокна может быть сформирован на изделиях относительно сложной конфигурации и имеет прочное сцепление с подложкой с сохранением заданной формы [7–9].

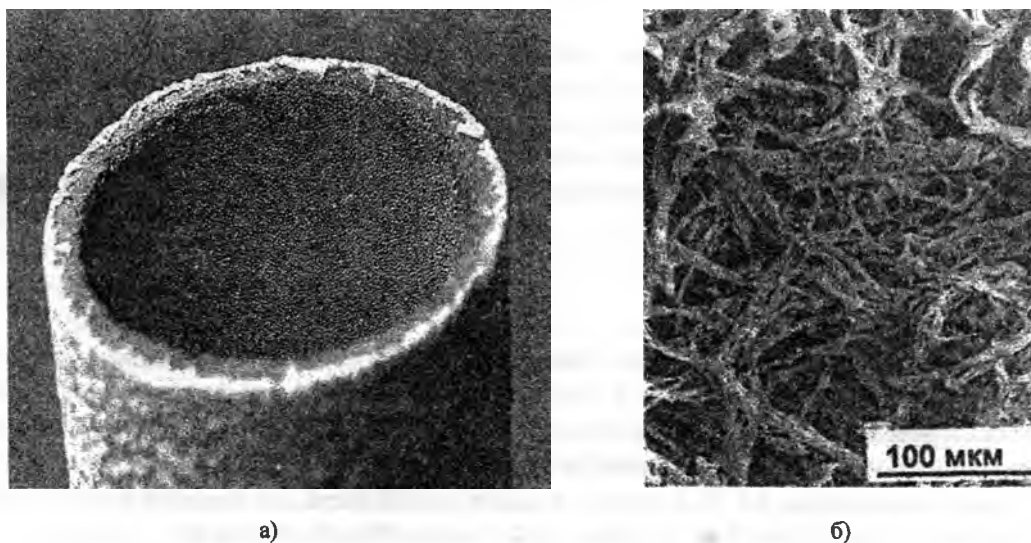


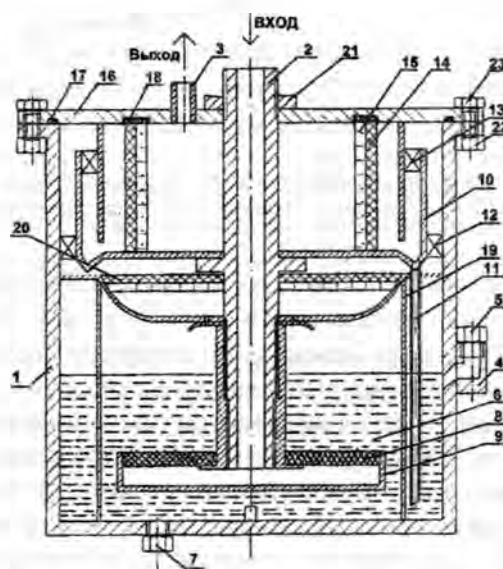
Рис. 2. Внешний вид (а) и фрактограмма поверхности пористого материала на основе ПТФЭ при увеличении $\times 300$ (б)

На основании проведенных исследований разработана конструкция устройства для очистки и осушки газов при отрицательных температурах. Внешний вид и схема разработанного устройства показаны на рис. 3.

Принцип работы устройства – отделение влаги за счет пропускания газа через фильтроэлемент из ППМ, помещенный в жидкий сорбент (ЭГ, ДЭГ), температура замерзания которого ниже минус 60 °С и который имеет способность поглощения влаги из газа. Второй композиционный металлополимерный фильтроэлемент обеспечивает конденсацию паров жидкости на его поверхности и, при образовании капель влаги, их отделение от газа и возврат назад в камеру с жидким абсорбентом.



а)



б)

Рис. 3. Внешний вид (а) и схема устройства (б) для осушки газов при отрицательных температурах:

1 – корпус; 2 и 3 – штуцера выхода входа газа, 4 – штуцер залива жидкого сорбента 5 – пробка; 6 – жидкий сорбент; 7 – пробка для слива сорбента, 8 – пористый элемента; 9 – корпус распределителя газа; 10 – кожух; 11 – патрубок для возврата сорбента; 12 и 13 – лопатки-завихрители; 14 – фильтрующий элемент; 15 – армирующая втулка с отверстиями; 16 – крышка корпуса; 17, 18 – уплотнительные кольца; 19 – камера; 20 – пористый элемент; 21 – прижимная гайка; 23 – гайка

Разработанное устройство испытано в лаборатории процессов и оборудования фильтрации и сепарации ГНУ ИПМ и может применяться в системах управления шаровыми кранами для очистки и сушки импульсного газа приборов автоматики на компрессорных станциях и газопроводах, а также для обеспечения работ пневмосистем автотранспорта при отрицательных температурах. Конструкция устройства защищена двумя патентами Республики Беларусь (№№ 8273, 9389).

Выводы

На основании проведенных исследований разработан пористый композиционный металло-полимерный материал и устройство на его основе для очистки и осушки газов при отрицательных температурах. Принцип работы устройства – отделение влаги за счет пропускания газа через фильтроэлемент из ППМ, помещенный в жидкий абсорбент (ЭГ, ДЭГ), температура замерзания которого ниже минус 60 °С и который имеет способность поглощения влаги из газа. Второй фильтроэлемент обеспечивает конденсацию паров абсорбента на его поверхности и, при образовании капель жидкости, их отделение от газа и возврат назад в камеру с жидким абсорбентом. Разработанное устройство может применяться в системах управления шаровыми кранами для очистки и сушки импульсного газа приборов автоматики на компрессорных стан-

циях и газопроводах, а также для обеспечения работ пневмосистем автотранспорта при отрицательных температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синайский, Э.Г. Сепарация многофазных многокомпонентных систем/ Э.Г. Синайский, Е.Я. Лапига, Ю.В. Зайцев. – Москва: Недра. – 2002. – 226 с. 2. Байков, Н.М. Гликоли и опыт их применения в нефтяной и газовой промышленности / Н.М. Байков, И.И. Тойгузин, Т.А. Сайфеев, А.Г. Зарипов. – М.: ВНИИОНГ, 1970. – 152 с. 3. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники/ Н.В. Кельцев. – Москва: Химия, 1984. – 592 с. 4. Совершенствование процессов сепарации и сепарационного оборудования/Г.К. Зиберт [и др.] //Наука и техника в газовой промышленности. – 2004. –№3/4. –С.48–53. 5. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей: пер. с англ. А. Адамсон. – Москва: Мир. – 1979. –378 с. 6. Абрамзон, А.А. Поверхностно-активные вещества/ А.А. Абрамзон. –Ленинград: Химия. – 1981. –366 с. 7. Ilyuschenko, A.Ph. Porous Powder Materials for Effective Cleaning Gases and Liquids / A.Ph. Ilyuschenko, L.P. Pilinevich, M.V. Tumilovich, A.G. Kravtsov // Powder Metallurgy: Proceedings of World Congress & Exhibition, Nice, France, 22–24 Oct., 2001 / EPMA. – Nice, 2001. –Vol. 1. – P. 354–358. 8. Ilyuschenko, A.Ph. Composite metal-polymer porous materials for gases dehumanization and fuel dewatering / A.Ph. Ilyuschenko, L.P. Pilinevich, M.V. Tumilovich, V.V. Savich, A.G. Kravtsov, I.A. Ryabchenko // Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges: Proceedings of Conf. – Kyiv, Ukraine, 4–8 Nov., 2002 / Ин-т проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины; редкол.: В.В. Скороход [и др.]. – Киев, 2002. – Vol. 2. – P. 791-792. 9. Толстопятов, Е.М. Комплексная модель абляции политетрафторэтилена излучением CO₂ лазера в вакууме/Е.М. Тостопятов, П.Н. Гракович / Полимерные композиты и трибология «Поликоптриб – 2005». Тез. докл. международной научно-практической конференции, Гомель, 18-21 июля 2005 г./ ИММС НАН Беларуси; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Гомель: ИММС, 2005. – С. 47–48.

УДК 621.9.011:517.962.1

Туромша В.И, Довнар С.С, Туми Эль-Мабрук Абуджафер Али

ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ ОПОР СТОЛА ПРОДОЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Было проведено конечно-элементное моделирование [1,2] стандартной винтовой регулируемой станочной опоры конструкции МЗОР. Она поддерживает неподвижный стол продольно-фрезерного станка с ЧПУ типа «Гентри». На рис.1 показан секционный стол А, несущий нагрузку от модельной детали В. Между столом и бетонным основанием С размещаются опоры, являющиеся темой данной работы.

Каждая опора воспринимает вертикальные сжимающие нагрузки, в основном от веса стола и обрабатываемой детали, и горизонтальные сдвигающие нагрузки от силы резания. Под одной секцией стола длиной 4000 мм, шириной 2500 мм и весом 10 т находится 15 опор. Полная высота опоры 210 мм, характерный наружный диаметр 110 мм. Опорная пятая опоры имеет диаметр 200 мм при толщине 30 мм. Данную конструкцию опоры будем называть далее цилиндрической.

Модель несущих частей опоры показана на рис.2,а в четвертном разрезе. Здесь объект А – бетонное основание, стилизованное под усеченный конус (высота 665 мм). На него опирается стальная втулка В, в которую входит стальной винт С. На буртиках винта лежит нижняя поверхность чугунового стола D (представлен своим опорным гнездом). В районе Е втулка и винт

сопрягаются по резьбе. С помощью резьбы стол точно регулируют по высоте, обеспечивая его плоскостность и горизонтальность. Известно, что в резьбе активно взаимодействуют друг с другом лишь несколько первых витков. В данной модели резьбу отображали две пары «кольцевая канавка на втулке – кольцевой выступ на винте». Их поверхности были покрыты контактными конечными элементами. Профиль канавок соответствовал резьбе М68*2. Мелкий шаг резьбы был установлен заводом для точной регулировки опоры по высоте. Моделирования двух витков было достаточно. Обнаружилось, что 2/3 веса стола воспринимает верхний виток. Нижний виток всегда недогружен.

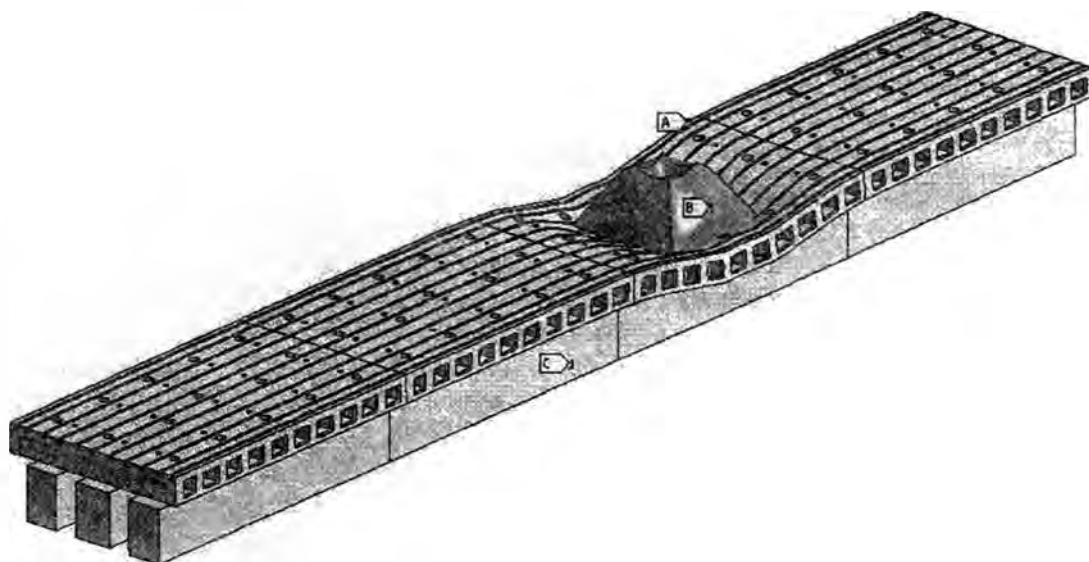


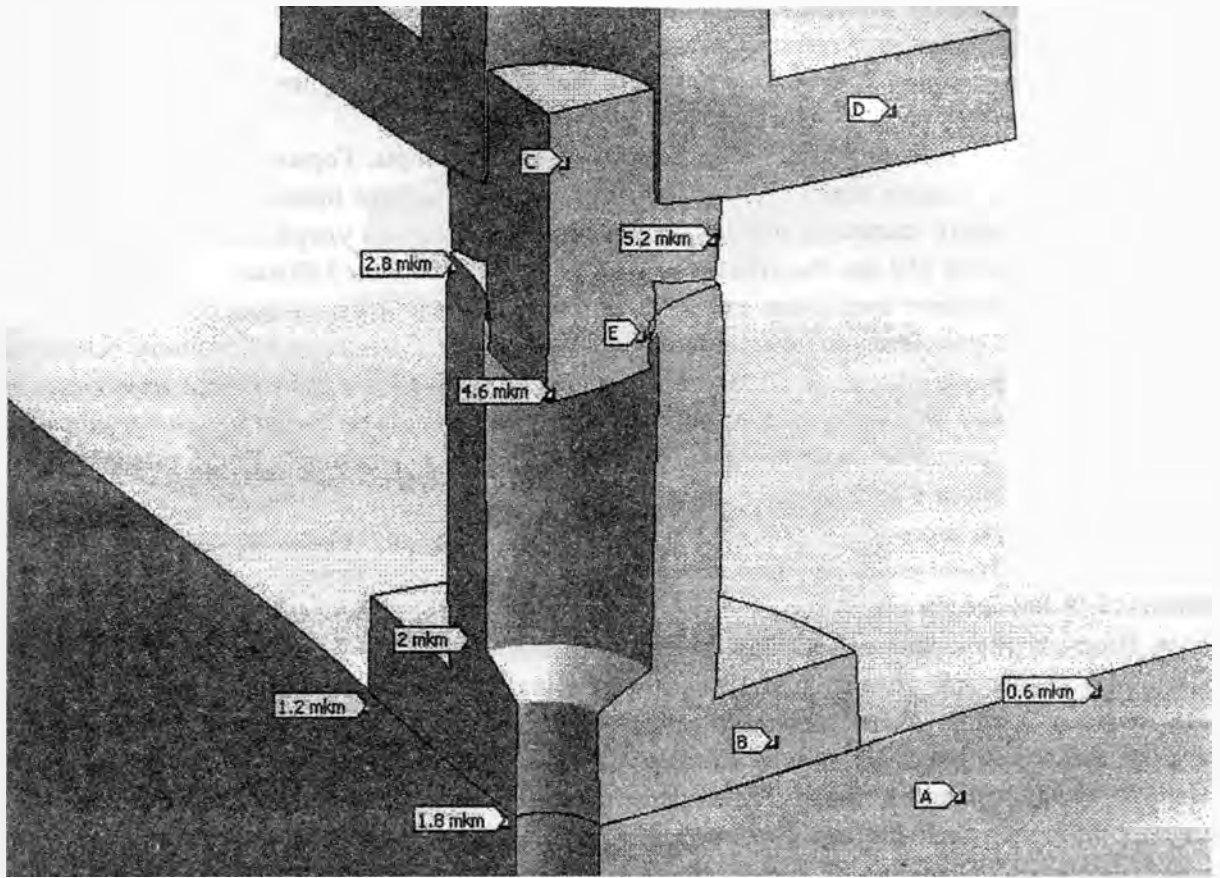
Рис. 1. Стол продольно-фрезерного станка (А), нагружаемый модельной деталью (В) и опирающийся на бетонное основание (С)

На рис.2,а опора сжата пробной вертикальной силой 10 кН. Эта сила соответствует максимальной ожидаемой нагрузке опоры. Контактующие поверхности предполагались идеализированными, без зазоров и контактной податливости. Расчет выполнен в упругой статической постановке для модуля упругости стали $E = 2,0$ ГПа и коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Для чугунного стола принято $E = 1,3$ ГПа и $\mu = 0,25$. Для бетонного основания $E = 0,3$ ГПа и $\mu = 0,2$.

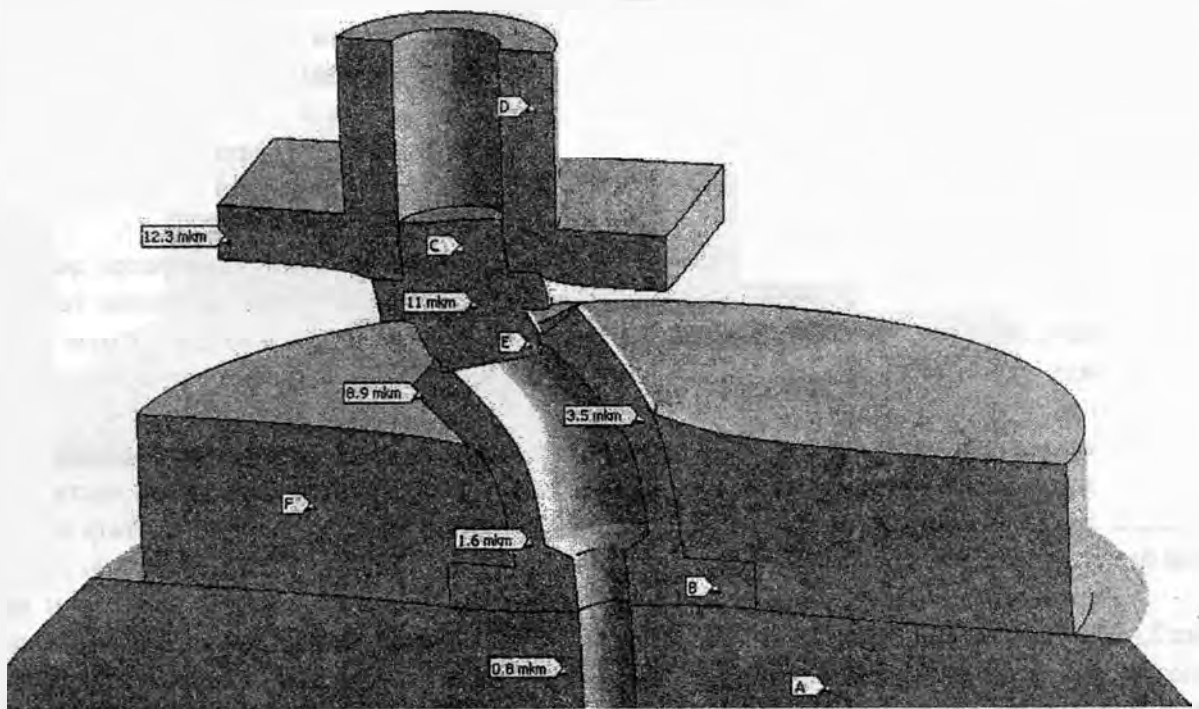
Перемещения на рис.2,а (и всех последующих) масштабированы в 7500 раз. Числа показывают упругие смещения вниз в микрометрах. Перемещение винта составило 5,2 мкм. Это означает, что совокупная жесткость опоры равна 1920 Н/мкм. Примерно третья часть вертикальных смещений обусловлена податливостью бетона. В нем максимальное перемещение 1,8 мкм наблюдается под центром опоры. Однако деформации бетонного основания сильно локализованы из-за неравномерного давления. Вне пяты опоры, на диаметре 300 мм смещения бетона составляют только 0,6 мкм.

Следовательно, податливость основания может быть снижена в 2-3 раза. Это достижимо путем увеличения размеров пяты втулки В, а также придания пяте конической или пирамидальной формы. При дисковой форме она сильно гнется – отметки 1,2 мкм и 1,8 мкм. Можно также размещать в бетоне под опорами стальные закладные детали.

Сама втулка В является жесткой деталью, несмотря на удлиненную форму. Её собственная деформация составляет около 0,8 мкм (разность между отметками 2,8 мкм вверху и 2,0 мкм внизу втулки). Также хорошей жесткостью обладает и винт С. В нем смещения вниз колеблются в пределах 4,6 – 5,2 мкм (в основном, из-за изгиба опорных буртиков).



a



б

Рис. 2. Цилиндрическая опора стола станка под действием вертикального сжатия 10 кН (а) и сдвигающей горизонтальной силы 10 кН (б)

Однако, между винтом и втулкой происходит резкий скачок смещений от 2,8 до 4,6 мкм. Это обусловлено упругой деформацией витков резьбы Е. Резьба является самым податливым местом в опоре. Очевидными рекомендациями являются увеличение шага и диаметра резьбы. Однако это затрудняет точную регулировку опоры.

На рис.2,б дана картина сдвиговых деформаций опоры. Горизонтальная сила 10 кН действует справа налево через стол станка D. В данном расчете принято, что в резьбе контактные поверхности схвачены друг с другом. Втулку от сдвига удерживает диск F – бетонная заливка высотой 110 мм. Расстояние между заливкой и столом 100 мм.

Горизонтальное смещение стола составило 12,3 мкм, а сдвиговая податливость 810 Н/мкм. Это в 2,5 раза меньше чем, податливость на сжатие. Смещения в бетонном основании невелики. В первую очередь, сдвиговая податливость обусловлена изгибом влево втулки. Втулку удерживает от изгиба диск–заливка F. Если его сделать не бетонным, а чугунным, то горизонтальное смещение снижается до 9,7 мкм (на 21 %). В отсутствие диска смещение достигает 28,6 мкм (рост в 2,32 раза).

Во вторую очередь, горизонтальные сдвиги стимулирует шарнирность сопряжения втулки и винта. Из-за упругой податливости витков резьбы винт имеет возможность проворачиваться (в плоскости рис.2,б) относительно втулки. Втулка работает как защемленная консоль. Винт нагружает, но не поддерживает ее верхний конец.

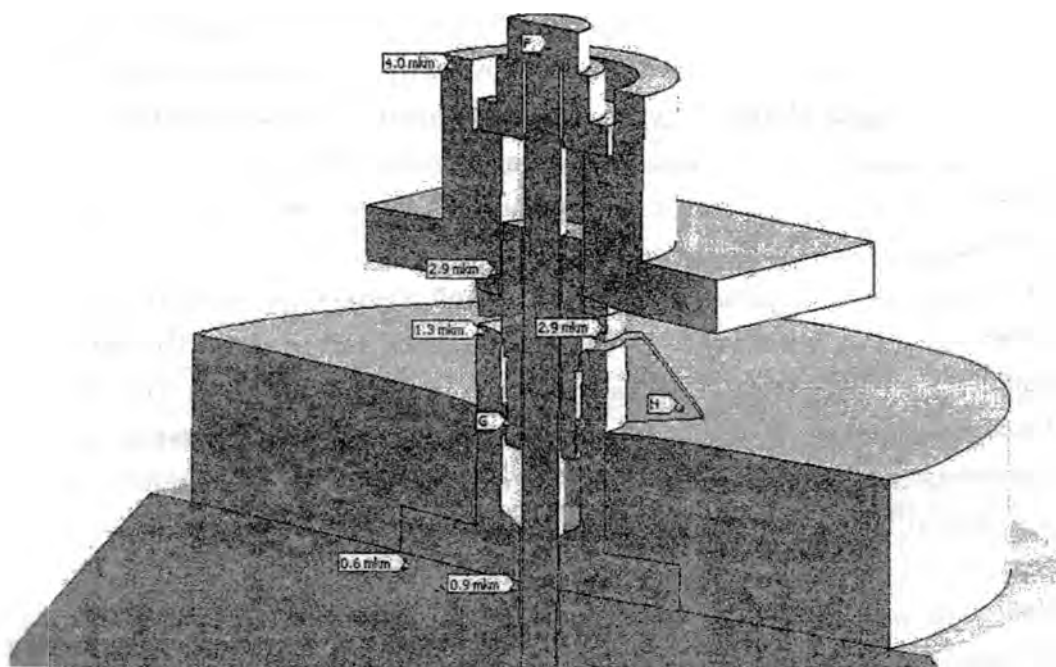
На сдвиговую податливость опоры сильно влияет состояние резьбы. Рис.2,б соответствует схватыванию между винтом и гайкой. Если же между контактирующими поверхностями резьбы при хорошей смазке возможно легкое микрометрическое проскальзывание, то шарнир между втулкой и винтом становится почти идеальным (для микроскопических перемещений). Сопrotивление повороту винта относительно втулки падает. В результате сдвиг возрастает в 2,67 раза – до 32,9 мкм. На практике возможно различное состояние резьбовых поверхностей втулки и винта. Поэтому сдвиговая жесткость опоры может колебаться в большом диапазоне – примерно от 300 до 800 Н/мкм.

Таким образом, соотношение между жесткостями на сдвиг и на сжатие следует консервативно оценить как 1: (6...7). Конструкция опоры имеет резервы повышения жесткости. На рис.3,а представлена доработанная конструкция опоры. Опорная пятя увеличена и выполнена в виде квадрата со стороной 240 мм и толщиной 30 мм. На нее усилия от резьбы передают ребра Н. Ребра повышают изгибную жесткость пятя опоры. Данную опору будем называть далее пирамидальной.

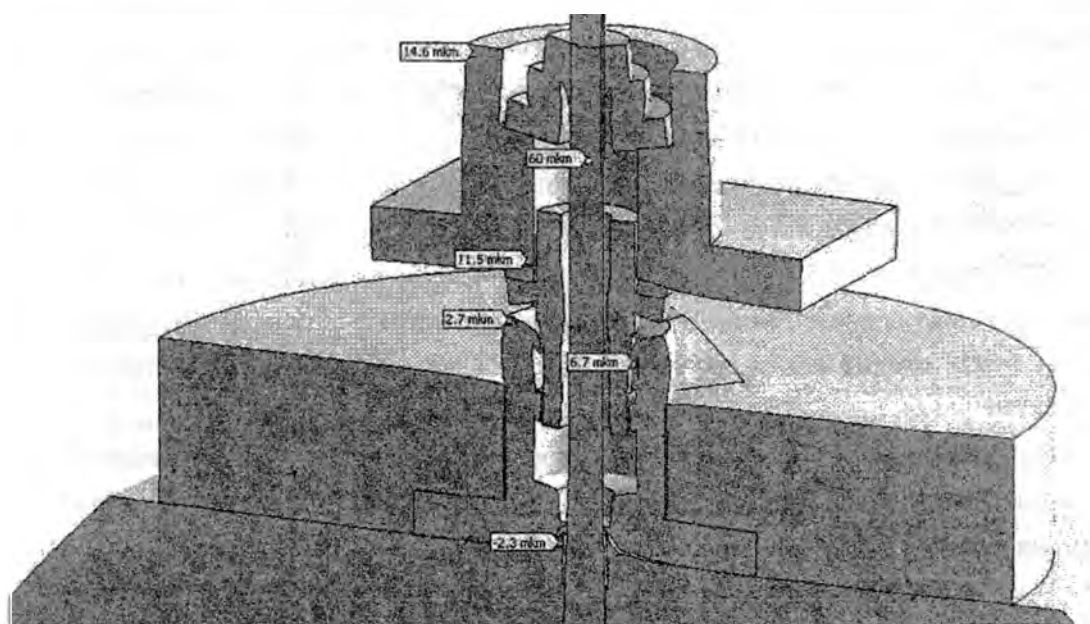
Под действием вертикальной сжимающей силы 10 кН пирамидальная опора демонстрирует лучшую жесткость, чем цилиндрическая. Перемещение винта составило только 2,9 мкм (56% от перемещения на рис.2,а). Проседание по верху втулки равно 1,3 мкм. Разность между этими величинами (1,6 мкм) существенна и обусловлена, во многом, податливостью резьбы.

Жесткость стальной опоры на рис.3,а составляет 3450 Н/мкм. Жесткость бетонного основания (по максимальному проседанию) достигает 11100 Н/мкм. Жесткость части чугунного стола, находящейся над опорой, равна 9100 Н/мкм. Бетон следует считать хорошей базой для призматической опоры. Он отвечает только за 22% проседания стола.

Перемещение бетона под опорой на рис.3,а оказывается вдвое меньше, чем на рис.2,а. Это обусловлено, в основном, ребрами Н. Они делают опору жесткой и выравнивают нагрузку на бетонное основание. Примерно 60% силы сжатия от стола передается вниз через пятю опоры. Около 30% передает через касательные напряжения бетонный диск – заливка, охватывающий опору. Остальная часть направляется через затянутый анкерный болт.



a



б

Рис. 3. Призматическая опора стола станка под действием вертикального сжатия 10 кН (а) и силы натяжки анкерного болта 50 кН (б)

Расчетная модель дополнена анкерным болтом F. Винт сопрягается со втулкой не только по резьбе, но и через район G. Здесь предусмотрена возможность фиксации винта относительно втулки заливкой, например, пластикового состава. Принято, что пластиковая заливка образует в районе G вкладыш толщиной 1 мм и высотой 20 мм.

Пластиковый вкладыш G (рис.3,а) также участвует в снижении вертикальных перемещений. Он передает часть усилия с винта на опору, разгружая резьбу. Однако, чтобы эта часть была существенной (23%), модуль упругости пластика должен составлять 2000 МПа. Типичные фиксирующие компаунды имеют модуль упругости на 1-2 порядка ниже. Поэтому технология фиксации должна быть ориентирована на очень малую толщину вкладыша, необходимую для повышения его жесткости.

Пирамидальная опора обладает лучшей сдвиговой жесткостью, чем цилиндрическая. Для нагружения, аналогичного (рис.2,б), горизонтальное перемещение составило 8,7 мкм (уменьшение в 1,41 раза). Сдвиговая жесткость соответственно равна 1150 Н/мкм. Соотношение жесткостей на сдвиг и на сжатие составляет 1: 3. Этот результат соответствует зафиксированной резьбе. При легком микрометрическом проскальзывании в резьбе сдвиговая податливость резко возрастает. Разница между цилиндрической и пирамидальной опорой оказывается несущественной.

Таким образом, подтверждается важность фиксации резьбы после регулировки стола по высоте. Виртуальные опыты с пластиковым вкладышем показали его небольшую эффективность при сдвиговом нагружении. Вероятно, нужна система введения фиксирующего состава непосредственно в зазоры резьбы.

Недостатком винтовой опоры стола, как цилиндрической, так и пирамидальной формы, является то, что анкерный болт окончательно затягивается после регулировки стола по высоте. При этом стол существенно проседает и возникают новые неточности. На рис. 3,б показаны результаты МКЭ-моделирования упругих деформаций после затяжки анкерного болта М30 относительно небольшой силой 50 кН. Другие нагрузки отсутствуют.

Стержень болта поднимается вверх на 60 мкм и более. Стол опускается на 14,6 мкм. Опора сжимается на 11,5 мкм. Около половины этой деформации связана с резьбой. Таким образом, в сравнении с рабочими нагрузками, наблюдаются большие перемещения. Сила затяжки болта трудно контролируется. Даже небольшие колебания её приведут к разбросу в перемещении опор. Плоскостность стола будет нарушена.

Поэтому следует обратить внимание на опоры клинового типа [3]. Здесь полная затяжка болта производится до окончательной регулировки опоры по высоте. Поэтому колебания усилия затяжки анкерных болтов не существенны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 539 с.
2. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
3. www.fixatorenbau.de/2-engl-montage-richtvorgang.html

СВЕРЛЕНИЕ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В МОЛИБДЕНЕ СВЕРЛАМИ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

*Зеленогурский университет
Зелена Гура, Польша*

Молибден и его сплавы относятся к тугоплавким материалам. В данной группе материалов молибден занимает второе место после вольфрама и его сплавов по прочностным свойствам и первое место – по удельной прочности при температурах ниже 1350-1450°С. Из молибдена изготавливают сотовые панели космических летательных аппаратов, теплообменники, оболочки возвращающихся на землю ракет и капсул, тепловые экраны, обшивку кромок крыльев и стабилизаторы в сверхзвуковых самолетах. Молибден – перспективный материал для оборудования, работающего в среде серной, соляной и фосфорной кислот. В связи с высокой стойкостью молибдена в расплавленном стекле его широко используют в стекольной промышленности, в частности для изготовления электродов для плавки стекла. В настоящее время из молибденовых сплавов изготавливают также прессформы и стержни машин для литья под давлением алюминиевых, цинковых и медных сплавов. Высокая прочность и твердость сплавов молибдена при повышенных температурах обусловили их применение в качестве инструмента при горячей обработке сталей и сплавов давлением (оправки прошивных станков, матрицы, штампы).

В чистом виде молибден применяют в виде ленты или проволоки, в качестве нагревательных элементов электропечей, работающих в атмосфере водорода при температурах до 1600°С. Молибденовая жесть и проволока широко используются в радиоэлектронной промышленности и рентгенотехнике для изготовления различных деталей электронных ламп, рентгеновских трубок и других вакуумных приборов.

Поскольку данный материал имеет весьма низкую теплопроводность и высокую прочность, его обрабатываемость резанием весьма низкая, что отрицательно сказывается на производительности обработки.

Одним из путей повышения эффективности обработки резанием является применение износостойких покрытий на режущих инструментах. Согласно литературным данным, применение покрытий позволяет:

- значительно повысить период стойкости и надежность инструментов;
- увеличить производительность процессов обработки резанием;
- сократить расход дорогостоящих инструментальных материалов;
- повысить качество поверхностного слоя и точность размеров обработанных деталей.

Ниже излагаются результаты исследований процесса сверления сквозных отверстий в молибдене сверлами с различными покрытиями.

Обрабатываемый материал – молибден с добавками 0,18% Ti. Присутствие титана тормозит рост зерен и улучшает свариваемость. Микроструктура материала приведена на рис. 1, основные свойства – в табл. 1.

Таблица 1

Основные свойства молибдена

Параметр	Величина
Плотность, г/см ³	10,2
Твердость, НВ	185...192
Временное сопротивление, МПа	324
Модуль упругости, ГПа	330
Удельная теплопроводность, Вт/м·К	138

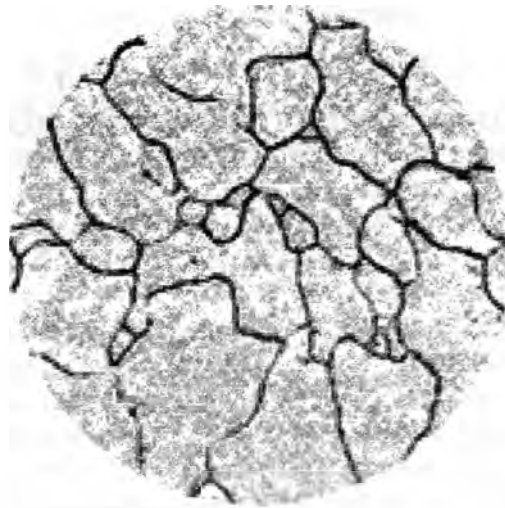


Рис. 1. Микроструктура молибдена ($\times 150$)

Сверление осуществлялось на проход на вертикально фрезерном станке F-251, толщина заготовки 5 мм. Охлаждающая жидкость – 10%-ный водный раствор эмульсола Castrol Syntilo RHS-EX. Исследования выполнялись при скорости резания 10 м/мин и подачах 25 – 63 мм/мин (0,04 – 0,10 мм/об.).

Использовались сверла из быстрорежущей стали (HSS) ГОСТ 886-77 со шлифованным профилем диаметром 5 мм с углом при вершине $2\phi = 118^\circ$, углом наклона стружечной канавки $\omega = 23^\circ$ и задним углом $\alpha = 6^\circ$. Сравнивались результаты сверления сквозных отверстий для непокрытых сверл и сверл с покрытиями Balinit®Futura Nano, Balinit®Hardlube и Balinit®X-Treme. Покрытия наносились методом PVD по технологии фирмы «Oerlikon Balzers Coating». Состав и некоторые свойства покрытий приведены в табл. 2.

Таблица 2

Состав и свойства исследуемых покрытий

Параметр	Futura Nano	Hardlube	X-Treme
Материал	TiAlN	TiAlN + WC/C	TiAlN
Микротвердость HV 0,05	3300	3000	3500
Коэффициент трения	0,30...0,35	0,15...0,20	-
Максимальная рабочая температура, °C	900	800...1000	800
Структура	Наноструктура	Многослойная	Однослойная
Внутренние напряжения, ГПа	-(1,7...2,0)	-(1,7...2,0)	-

На первом этапе исследований рассматривался характер заусенцев, образующихся на выходе сверла из отверстия. При обработке молибдена заусенцы имеют вид коротких фрагментов, расположенных по периметру отверстия, иногда встречаются остатки колпачков. Наибольшая высота заусенцев зафиксирована при использовании покрытия X – Treme.

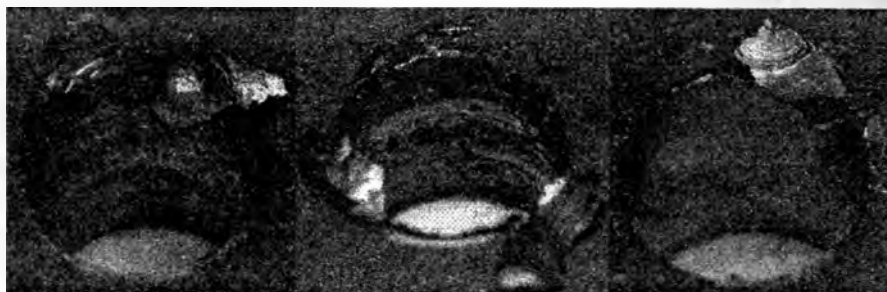


Рис. 2. Форма заусенцев при сверлении отверстий в молибдене

Стружки при сверлении молибдена имеют вид коротких конических спиралей, характерных для обработки хрупких материалов. Форма стружек практически не зависит ни от режима резания, ни от состава покрытия (рис.3).

Известно [1], что особенности процесса обработки можно оценить по коэффициенту утолщения стружки. При сверлении его величина рассчитывается по формуле $K_b = 2h_c/S_0 \sin\varphi$, где h_c – толщина стружки; S_0 – подача сверла; φ – главный угол сверла в плане. Характер влияния подачи и типа покрытия на коэффициент утолщения стружки показан на рис. 4. Легко заметить, что использование покрытий практически всегда увеличивает коэффициент утолщения стружки, иногда более чем в 2 раза. Возможно, это связано с особенностями взаимодействия покрытия с молибденом в зоне контакта. На основании приведенных данных можно прогнозировать отрицательное влияние покрытий на уровень сил и температур при сверлении отверстий в молибдене.

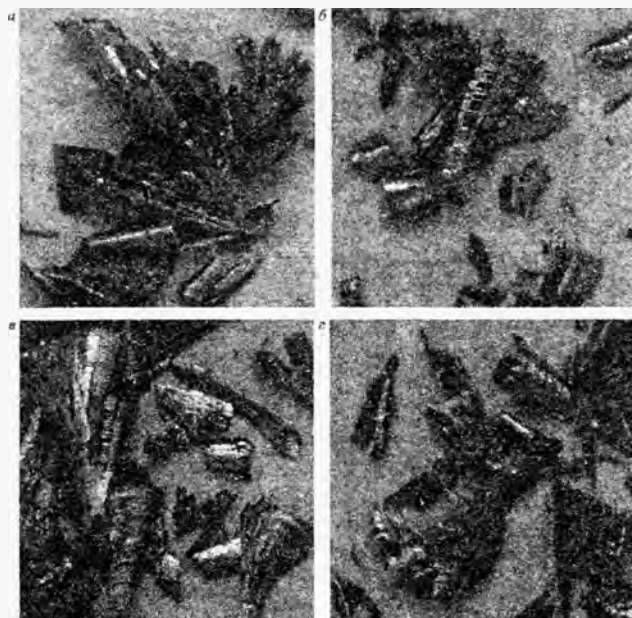


Рис. 3. Форма стружки при сверлении молибдена сверлами: а – без покрытия; б – с покрытием Futura Nano; в – с покрытием Hardlube; г – с покрытием X-Treme ($v = 10$ м/мин, $S = 50$ мм/мин)

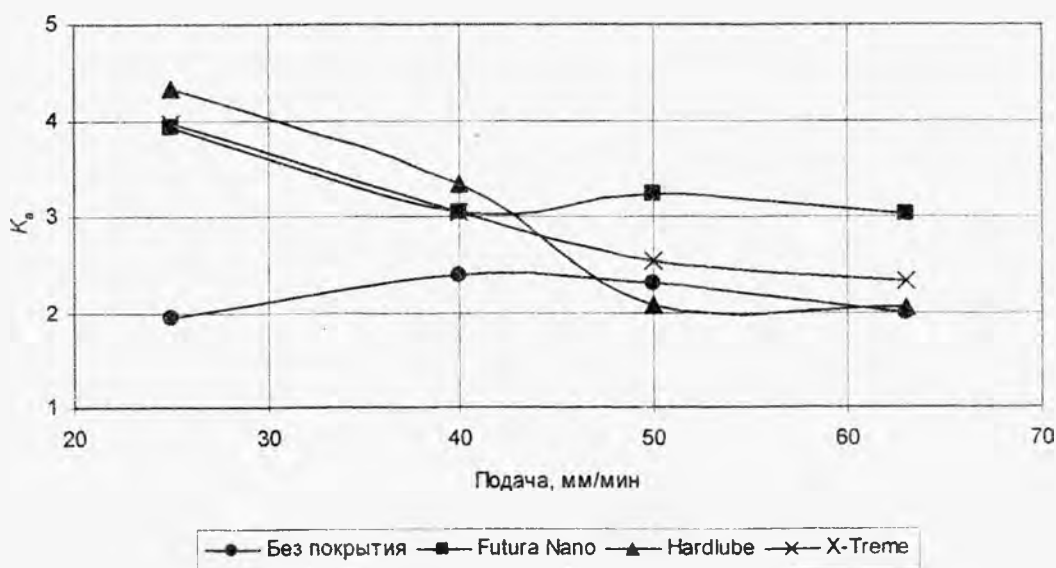


Рис. 4. Влияние подачи на коэффициент утолщения стружки

Условия взаимодействия материалов детали и инструмента (покрытия) весьма существенно влияют на характер износа и интенсивность изнашивания режущих лезвий. Сверла изнашиваются как по главным задним поверхностям, так и в области перемычки, причем износ сверл без покрытия (рис. 5, а, б) значительно превышает износ сверл с покрытиями (рис. 5, в).

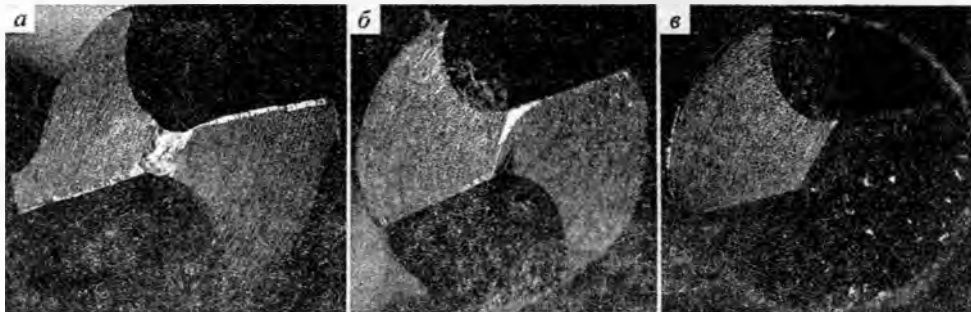


Рис. 5. Характер износа сверл при обработке молибдена

Интенсивность изнашивания сверл (рис. 6) определялась по зависимости

$$I = \sum_{i=1}^k \frac{(h_{31} + h_{32}) N_i l}{2 S_{\text{м}}},$$

где h_{31}, h_{32} – величины износа по двум главным задним поверхностям сверла; N_i – количество просверленных отверстий при i -й минутной подаче; l – толщина детали; $S_{\text{м}}$ – минутная подача сверла; k – количество использованных минутных подач.

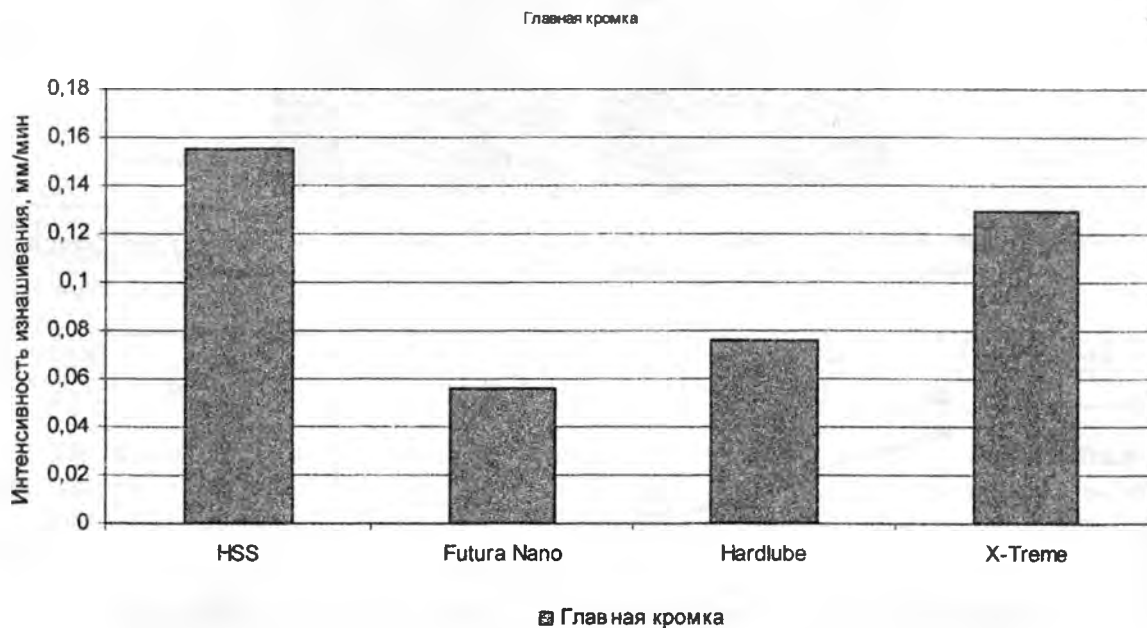


Рис. 6. Интенсивность изнашивания сверл с различными покрытиями

Точность обработки отверстий оценивалась по их разбивке (разнице диаметров сверла и отверстия). По рис. 7 легко установить, что подача практически не влияет на разбивку просверленных отверстий. В большинстве случаев точность просверленных отверстий находится в пределах 10-11 квалитетов точности по ГОСТ 25346-82, однако покрытие „X-Treme” обеспечивает гораздо более высокую точность.

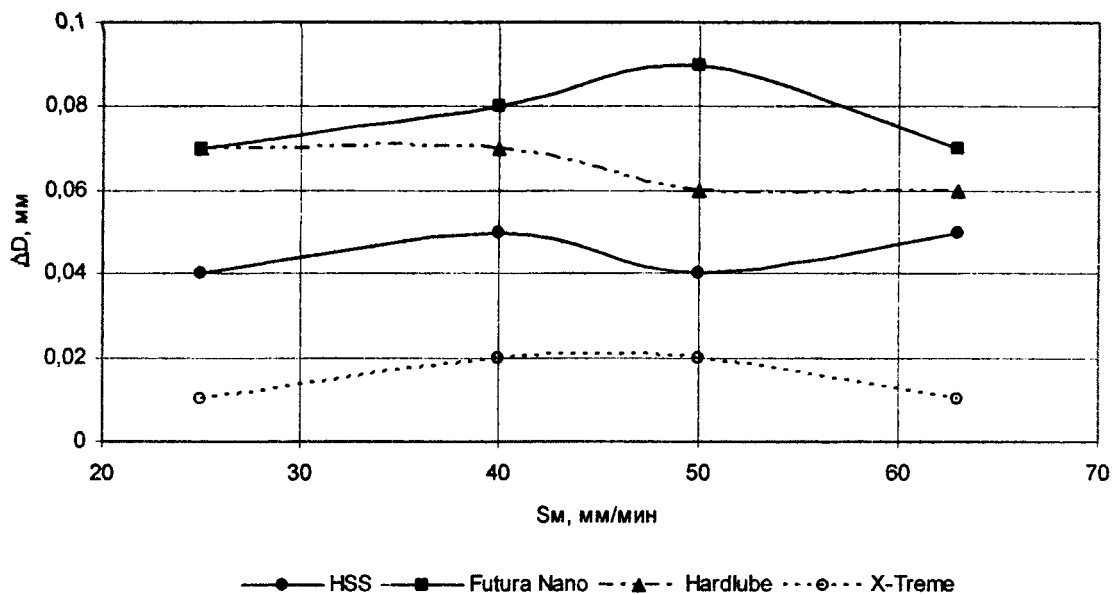


Рис. 7. Влияние покрытия на разбивку просверленного отверстия

Таким образом, использование покрытий оказывает влияние на условия стружкообразования и точность просверленных отверстий при обработке молибдена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Учебник. Изд. 2, перераб. и доп. Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.

УДК 621.941

Фельдштейн Е.Э., Х. Паха-Голенбиовска

ВЛИЯНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА НА ГЕОМЕТРИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ АНТИФРИКЦИОННОГО ЧУГУНА

*Зеленогурский университет, Высшая техническая школа
Зелена Гура, Лешно, Польша*

Одной из тенденций развития современной техники является использование материалов, наиболее приспособленных к новым, более высоким требованиям. Инструментальные материалы для обработки резанием должны выполнять весьма высокие технические характеристики – высокие твердость и ударную вязкость, сопротивление изнашиванию и теплопроводность. Обработка резанием чугунов характеризуется рядом специфических особенностей, в том числе формой графитовых включений (пластинчатых или сфероидальных). Используемые для обработки чугунов инструментальные материалы обычно не учитывают данного различия.

Целью исследования являлось определение инструментального материала, обеспечивающего минимальную шероховатость обработанной поверхности деталей из антифрикционного чугуна при их высокой размерной точности. Исследовался легированный антифрикционный чугун EN-GJS2131, используется для производства поршневых колец бензиновых двигателей внутреннего сгорания. Материал имеет сложный химический состав, временное

сопротивление $\sigma_s = 150$ МПа (табл. 1) и ферритно-перлитную микроструктуру с пластинчатым графитом (рис.1). Трубы, предназначенные для производства поршневых колец, производятся центробежным литьем, обеспечивающим высокие однородность структуры и механические характеристики материала.

Таблица 1

Химический состав исследованных чугунов

Материал	Содержание химических элементов, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
EN-GJS2131	2,49	2,2	1,05	0,33	0,039	0,044	0,013	7,471

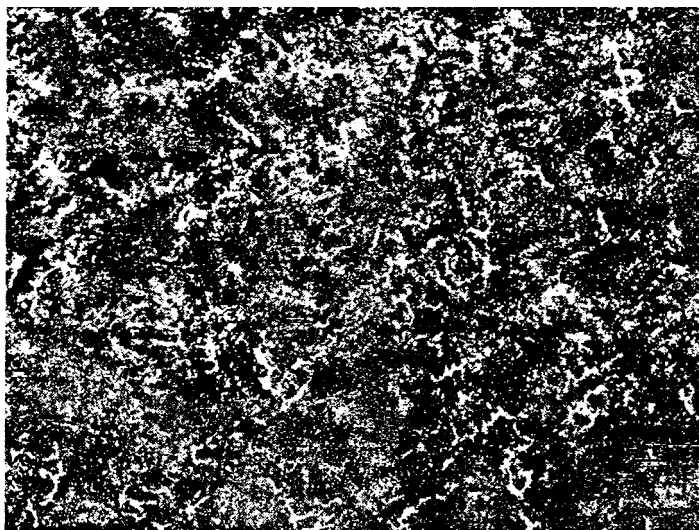


Рис. 1. Микроструктура чугуна EN-GJS2131 ($\times 100$)

Обработка поверхностей осуществлялась резцами, оснащенными сменными неперетачиваемыми пластинами с радиусом вершины 0,8 мм, изготовленными из следующих инструментальных материалов:

- 1) кубического нитрида бора CBN 7050, покрытого слоем нитрида титана TiN (фирма Sandvik Coromant [1]);
- 2) нитридная керамика CC 6090 без покрытия, обеспечивающая высокое сопротивление истиранию при повышенных температурах (фирма Sandvik Coromant [1]);
- 3) твердый сплав K10 без покрытия, характеризующийся высоким сопротивлением истиранию и значительной ударной вязкостью (фирма Mitsubishi [2]).

Точение выполнялось всухую на станке с ЧПУ Talent 6/45 в диапазоне скоростей резания 290...1100 м/мин, диапазоне подач подачами 0,03...0,3 мм/об с глубиной резания 0,25 мм. Исследования шероховатости обработанной поверхности выполнялись на профилометре Perthometr S2, внешний вид поверхностей анализировался с помощью цифровой камеры Bresser USB0,3MP. Микротвердость измерялась на микротвердомере Micromet II с нагрузкой 50 г.

На рис. 2 показаны профилограммы поверхностей, обработанных пластинами из различных инструментальных материалов. Легко заметить преимущества пластин из сверхтвердого материала по сравнению с керамикой и твердым сплавом.

Влияние подачи на шероховатость обработанных поверхностей показано на рис. 3. Легко заметить, что в диапазоне подач 0,1...0,15 мм/об параметр Ra принимает минимальные значения в случае использования пластин из керамики CC6090 и твердого сплава K10. При использовании пластин из сверхтвердого материала CBN7050 подача на шероховатость не влияет. Минимальная шероховатость достигается при использовании керамических пластин

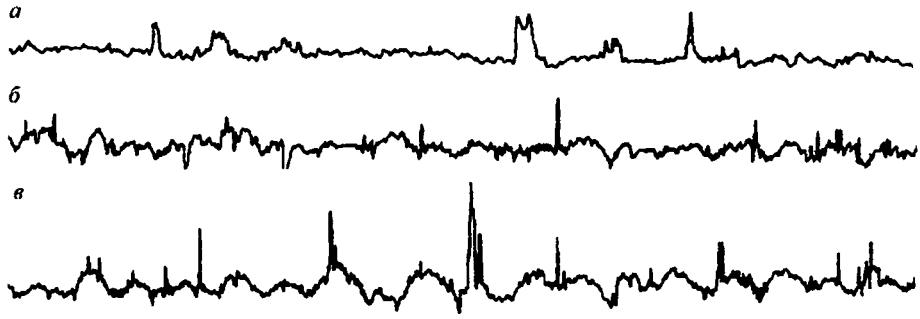


Рис. 2. Профилограммы обработанных поверхностей:
 а – пластина из CBN7050; б – пластина из CC6090; в – пластина из K10

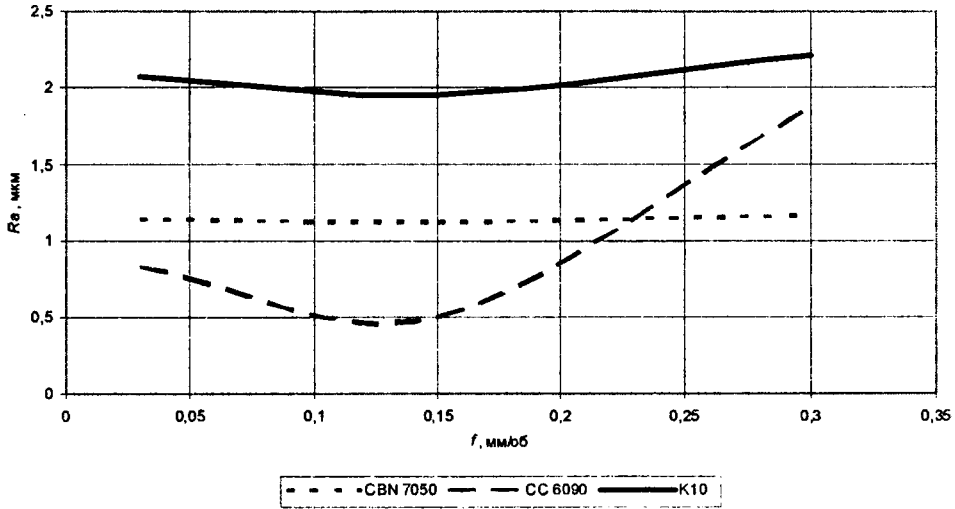


Рис. 3. Влияние подачи на параметр Ra шероховатости поверхности

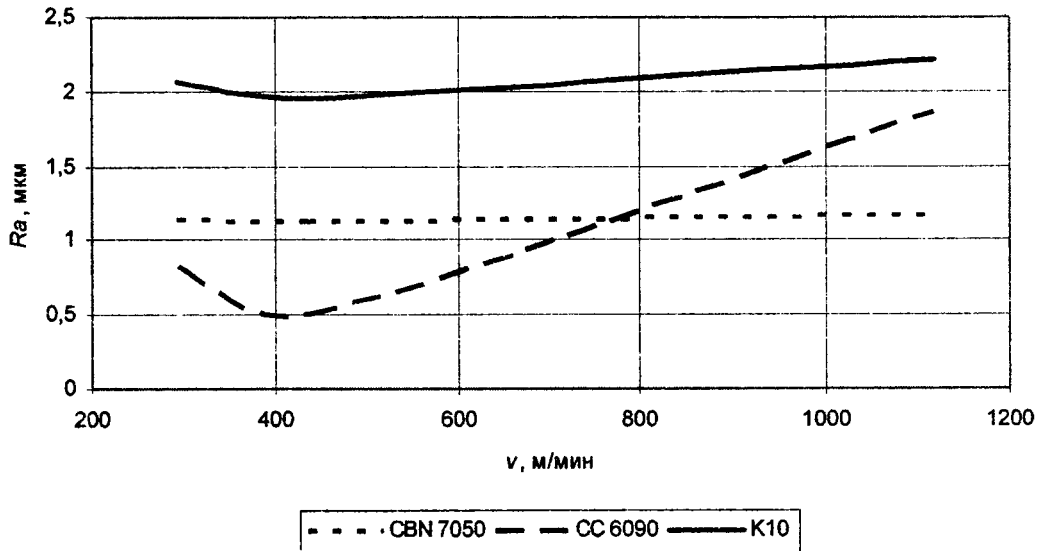


Рис. 4. Влияние скорости резания на параметр Ra шероховатости поверхности

Влияние скорости резания на шероховатость обработанных поверхностей показано на рис. 4. При скорости резания 400 м/мин параметр Ra принимает минимальные значения в случае использования пластин из керамики CC6090 и твердого сплава K10. При использовании

пластин из сверхтвердого материала CBN7050 скорость резания на шероховатость не влияет. Минимальная шероховатость достигается при использовании керамических пластин.

Внешний вид поверхностей, обработанных пластинами из различных инструментальных материалов в условиях максимальной производительности, показан на рис. 5. При использовании пластин из твердого сплава K10 поверхность характеризуется значительной неоднородностью, заметны вторичные деформации поверхностного слоя, течение металла, появление налипов. Это соответствует характеру профилограмм обработанной поверхности (рис. 2) и свидетельствует о меньшей пригодности твердого сплава для обработки антифрикционных чугунов. Наилучшую геометрическую структуру имеет поверхность, обработанная пластинами из сверхтвердого материала CBN7050.

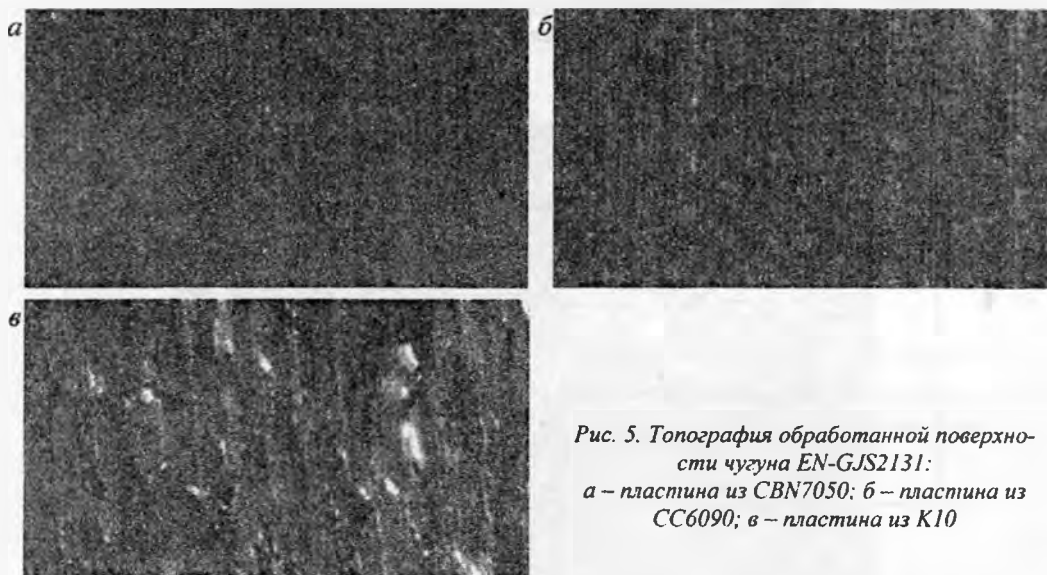


Рис. 5. Топография обработанной поверхности чугуна EN-GJS2131:
а – пластина из CBN7050; б – пластина из CC6090; в – пластина из K10

Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя показано на рис. 6. Можно заметить, что при использовании инструментальных материалов CC6090 и K10 на глубине до 0,3 мм имеет место некоторое разупрочнение поверхности, тогда как при использовании пластин из сверхтвердого материала глубина поврежденного слоя значительно меньше. Возможно, это связано с условиями отвода теплоты из зоны резания, поскольку теплопроводность кубического нитрида бора значительно выше по сравнению с керамикой и твердым сплавом.

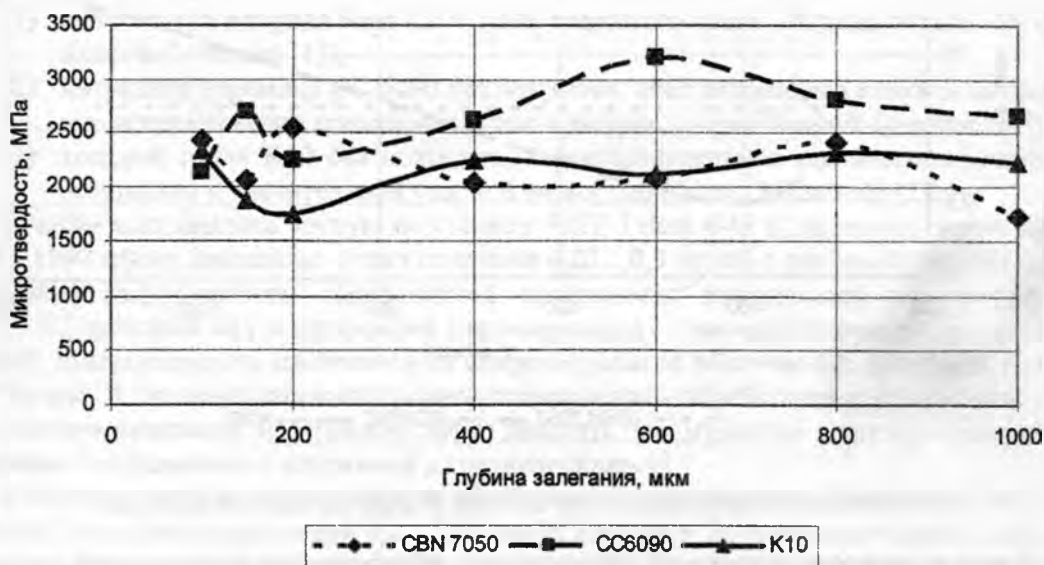


Рис. 6. Изменение микротвердости вглубь поверхностного слоя

Таким образом, на основании проведенных исследований установлены закономерности формирования геометрической структуры и микротвердости поверхностей деталей из антифрикционного чугуна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Narzędzia skrawające. Katalog główny firmy SANDVIK Coromant, 2007. 2. Narzędzia do toczenia. Katalog Generalny MITSUBISHI, 2007.

УДК621.793.1

Фролов И.С., Иващенко С.А., Мрочек Ж.А

КОНСТРУИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ОСОБЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Повышение надежности и долговечности машин и механизмов является важной народнохозяйственной задачей. Наиболее эффективный метод решения такой задачи заключается в увеличении ресурса работы лимитирующих деталей и узлов. Последнее особенно актуально, если эти узлы и детали работают в особых условиях. Под особыми условиями эксплуатации понимается: воздействие агрессивных сред, работа в вакууме, воздействие электромагнитного излучения, высокие температуры и удельное давление, трение без смазочного материала и др. В таких условиях работают изделия электронного приборостроения, судостроения, космонавтики, транспортного и энергетического машиностроения, химической промышленности и ряда других отраслей.

Естественно, что для обеспечения особых условий эксплуатации деталей и механизмов их рабочие поверхности должны обладать специальными физико-механическими свойствами: коррозионной стойкостью, вакуумной плотностью, теплостойкостью, износостойкостью, твердостью, контактной жесткостью и др. Создание этого комплекса свойств возможно формированием на рабочих поверхностях деталей многофункциональных покрытий, которые благодаря оптимальному сочетанию технологических, конструкционных и эксплуатационных параметров могут обеспечить получение изделий с требуемыми и прогнозируемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Анализ методов формирования покрытий, а также результаты экспериментальных исследований показывают, что наиболее перспективным для этих целей является вакуумно-плазменный электродуговой способ. В основе этого способа лежат процессы испарения под действием стационарной вакуумной дуги материала катода с одновременной ионизацией паров и формирования покрытий при взаимодействии плазменного потока с поверхностью изделия. Им получают в основном монослойные покрытия на основе карбидов, нитридов, карбонитридов тугоплавких металлов IV–VI групп Периодической системы элементов [1].

Однако использование монослойных покрытий из одного тугоплавкого соединения не всегда удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к многофункциональным покрытиям. Поэтому в качестве многофункциональных все большее применение находят композиционные покрытия различного типа, обладающие улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. К таким покрытиям относятся мультислойные покрытия переменного состава и, в частности, полосчатые покрытия.

Эти покрытия, представляют собой чередование мультислойных полос (участков) из износостойкого и антифрикционного материалов и сочетающие в себе преимущества мультислойных покрытий постоянного состава и обычных полосчатых покрытий. В качестве антифрикционного материала может использоваться медь, бронза и некоторые другие пластичные металлы.

Расположение полос из антифрикционного материала зависит от формы поверхности, типа движения в паре трения (возвратно-поступательное или вращательное) и направления вектора скорости относительного скольжения (рис. 1). Для плоских деталей при возвратно-поступательном движении полосы располагают параллельно друг другу в направлении, перпендикулярном вектору скорости относительного скольжения. Для деталей больших габаритов, длина и ширина которых соизмеримы, может использоваться шахматная схема расположения антифрикционных полос. В случае вращательного движения плоской поверхности полосы целесообразно располагать радиально относительно оси вращения изделия. Для деталей типа тел вращения при возвратно-поступательном движении в паре трения полосы наносятся в виде колец, а при вращательном движении – в виде полос, перпендикулярных вектору скорости относительного скольжения.

Относительно пластичные полосы из антифрикционного материала выполняют роль температурных барьеров и одновременно являются демпферами, компенсирующими увеличение или уменьшение линейных размеров покрытия при его остывании под влиянием разных коэффициентов термического расширения покрытия и основы, а также изменение объема конденсата вследствие происходящих в нем субструктурных изменений.

Формирование полос покрытия осуществляется с помощью накладных масок (или экранов специальных устройств) с прорезями соответствующих размеров. Наряду с функцией формообразования, маски выполняют роль холодильных элементов, обеспечивая дополнительный отвод теплоты от поверхности детали и снижая тем самым интегральную температуру поверхности.

Для особых условий эксплуатации были предложены полосчатые покрытия типа Cu-TiN, представляющие собой чередование мультислойных полос этих материалов [2]. Осаждение Cu проводилось при токе дуги 115 А и напряжении на подложке 100 В. В качестве материала катода использовалась медь М0 ГОСТ 859-78. Формирование полос покрытия на образцах осуществлялось при помощи накладных масок.

Исследование структуры полос меди показало, что она не зависит от толщины слоя покрытия. При всех толщинах имеет место мелкодисперсная структура без преимущественного направления роста кристаллитов, что подтверждается [3]. Микротвердость полос меди также не зависит от толщины слоя покрытия и составляет $(1,35...1,38) \times 10^3$ МПа. Поэтому толщина нанослоев Cu в мультислойных покрытиях $(\text{Cu-TiN})_x$ принималась равной толщине слоев TiN. Наличие полос меди в покрытии обеспечивает поступление твердой смазки в зону трения и, как следствие, повышает износостойкость упрочненной детали в условиях трения без смазочного материала за счет реализации ротапонтного метода смазывания.

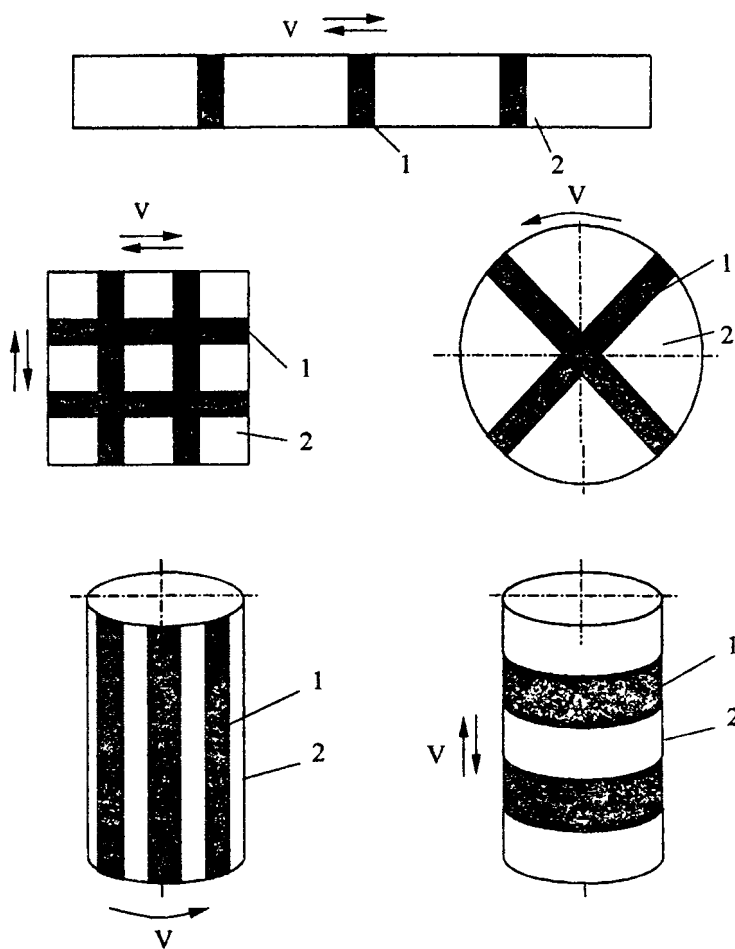


Рис. 1 Схемы расположения полос из антифрикционного материала в полосчатом покрытии: 1 – антифрикционный материал; 2 – износостойкий материал

Для формирования мультислойных полосчатых покрытий типа Cu-TiN была разработана технология поочередно-послойного их нанесения в вакууме.

Данная технология заключается в том, что участки из различных материалов получают путем многократного поочередного нанесения слоев материалов при периодическом движении поверхности детали между катодами – испарителями из наносимых материалов, работающими в импульсном режиме.

Продолжительность паузы между импульсами двух соседних в направлении движения поверхности детали катодов-испарителей из наносимых материалов определяется из соотношения:

$$A = t_d + (t_{отк} - t_d) \cdot K,$$

где t_d – время на перемещение детали между двумя соседними катодами-испарителями из наносимых материалов, с;

$t_{отк}$ – время, необходимое для откачки вакуумной камеры после нанесения слоя покрытия, с;

K – безразмерный коэффициент, принимающий следующие значения:

при $t_{отк} - t_d > 0$ $K=1$,

при $t_{отк} - t_d \leq 0$ $K=0$.

Продолжительность паузы между импульсами каждого катода-испарителя из наносимых материалов определяется из соотношения:

$$t_n = \sum_{i=1}^{m-1} t_{ui} + \sum_{j=1}^n A_j,$$

где t_{ui} – продолжительность работы i -го источника наносимых материалов, с;

A_j – продолжительность j -ой паузы между импульсами, с;

m – количество источников наносимых материалов;

n – количество перемещений детали между источниками наносимых материалов за один цикл нанесения покрытия.

Продолжительность паузы между импульсами двух соседних катодов-испарителей источников наносимых материалов A_j – это время между окончанием работы одного катода-испарителя и включением соседнего. Время, необходимое для откачки вакуумной камеры после нанесения слоя покрытия $t_{отк}$, является технологическим параметром установок вакуумно-плазменного нанесения покрытий. Поэтому после окончания работы катода-испарителя необходима откачка вакуумной камеры для достижения оптимального давления.

Количество m катодов-испарителей из наносимых материалов и количество n перемещений детали между ними являются взаимосвязанными параметрами, т.е. $n=f(m)$. Причем их соотношение зависит от схемы движения детали между катодами-испарителями. Например,

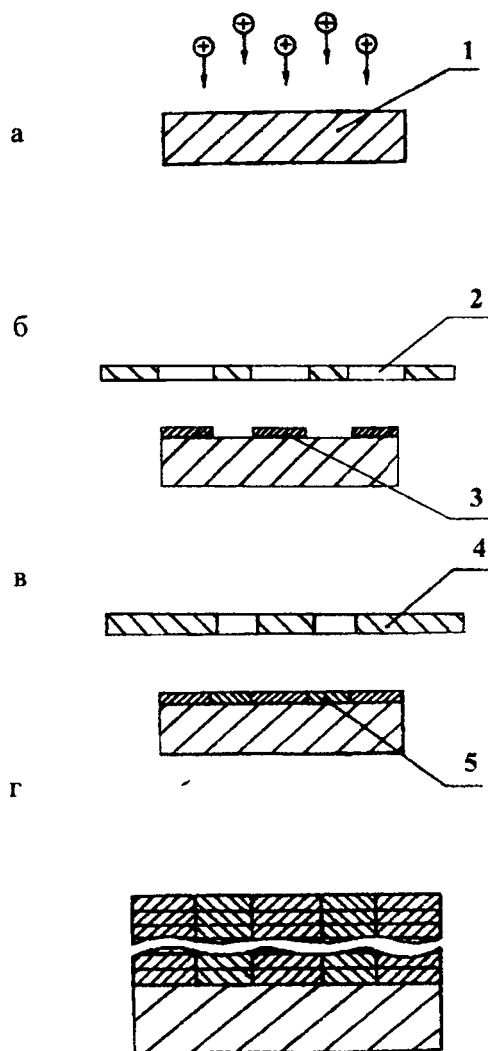


Рис. 2 Схема последовательности получения мультислойного полосчатого покрытия на плоских деталях:

- а – ионная бомбардировка поверхности основы 1;
- б – нанесение через экран-маску 2 полос износостойкого материала 3;
- в – нанесение через экран-маску 4 полос антифрикционного материала 5;
- г – конструктивная схема мультислойного полосчатого покрытия

при циклическом линейном или круговом движении (деталь после прохождения последней позиции возвращается к первой) $n=m$, а при линейном движении детали (после прохождения последней позиции деталь возвращается к первой, проходя через все позиции в обратном порядке) $n = 2m - 1$.

Последовательность получения мультислойного полосчатого покрытия показана на рис. 2. Толщина слоя покрытия, наносимого за один цикл, должна лежать в строго определенных пределах. При этом нижний предел определяется толщиной нескольких атомарных слоев (2-3 и более), позволяющих обеспечить сплошность покрытия. Верхний предел толщины слоя для металлов IV–VI групп таблицы Менделеева и их карбидов, нитридов и карбонитридов равен $220-250a$, где a – период кристаллической решетки. При превышении этой толщины происходит формирование зерен с размерами, превышающими оптимальные для износостойких покрытий (1000–1500 Å). Такой рост зернистости приводит к образованию неблагоприятной структуры покрытия с большими напряжениями между крупными кристаллами. В результате, покрытия имеют пониженную прочность сцепления с основой, а устойчивость крупных зерен к распространению микротрещин при механических воздействиях является невысокой.

Исходя из этого, продолжительность работы (импульса) каждого катода-испарителя в вакуумной камере установки наносимых материалов определяется по формуле:

$$t_u = \frac{60h}{\Pi} ,$$

где h – толщина слоя покрытия, обеспечивающая получение мелкозернистой структуры с неупорядоченно-ориентированными зернами для данного материала, мкм;

Π – производительность установки при нанесении слоя данного материала, мкм/мин.

Величины h и Π определяются экспериментально или по литературным данным. Варьируя толщиной слоя h в допустимых пределах, можно получить слои различных материалов, наносимые в одном цикле, либо одинаковой, либо различной толщины в зависимости от требований, предъявляемых к геометрии покрытия.

Периодическое движение детали между катодами-испарителями из наносимых материалов, согласованное с импульсным режимом их работы строгой математической зависимостью, позволяет обеспечить необходимую

точность процесса нанесения покрытия с участками из различных материалов по предлагаемой технологии при любых схемах движения детали между катодами, а также избежать перегрева и нежелательных структурных превращений материала основы; уменьшить внутренние напряжения в покрытии. Все это способствует увеличению износостойкости детали и улучшению ее эксплуатационных свойств.

Однако комплексные износные испытания мультислойных полосчатых покрытий $(Cu-TiN)_x$ выявили некоторую нестабильность их фрикционных характеристик вследствие более интенсивного изнашивания полос антифрикционного материала в условиях трения без смазочного материала. Это приводит к дефициту смазочного материала в паре трения и, как следствие, увеличению момента и коэффициента трения.

Для устранения этого недостатка была разработана схема ступенчато-полосчатого покрытия типа $Cu/TiN-TiN/Cu$ и технология получения его в вакууме. Данная технология заключается в том, что каждую из полос покрытия выполняют путем многократного последова-

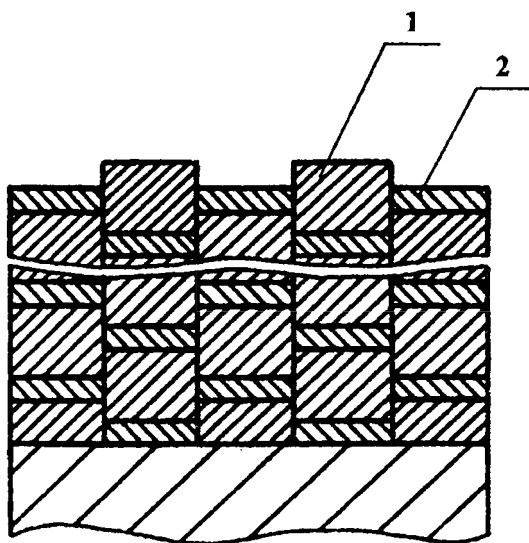


Рис.3. Схема мультислойного ступенчато-полосчатого покрытия:

1 – антифрикционный материал;

2 – износостойкий материал

тельного нанесения слоев из износостойкого и антифрикционного материалов (АМ), при этом из двух любых соседних полос одну наносят, начиная со слоя АМ, а другую – со слоя износостойкого материала (ИМ). Схема мультислойного ступенчато-полосчатого покрытия представлена на рис. 3, а последовательность получения этого покрытия — на рис. 4.

Толщины слоев из АМ и ИМ выбираются исходя из величины их часового износа в монослойном полосчатом покрытии. При этом оптимальный диапазон толщин слоев этих материалов составляет от одной до пяти величин их часового износа, а для того, чтобы слои из ИМ и АМ в любых соседних полосах изнашивались одновременно, величина часового износа материалов в слое покрытия принимается одинаковой для ИМ и АМ. При толщине слоя менее одной величины часового износа значительно уменьшается производительность, и покрытие обладает невысокими механическими свойствами.

При толщине слоев из ИМ и АМ более пяти величин их часового износа происходит формирование столбчатой крупнозернистой структуры покрытия, характеризующейся низкой адгезией и имеющей склонность к растрескиванию при механических воздействиях. Это приводит к снижению износостойкости покрытия. Толщина h_1 первого слоя АМ в полосах, начинающихся с этого материала, определяется зависимостью $h_1 = (0,65...0,85)h$, где h — толщина всех последующих слоев АМ (мкм) и обеспечивает превышение слоев АМ над соседними слоями ИМ. Она определяется, исходя из двух критериев: получения частично-регулярного микрорельефа поверхности с определенной высотой регулярных микронеровностей и объема АМ, необходимого как для качественной приработки упрочненной поверхности в начальный период эксплуатации, так и для стабильного поступления его в пару трения во время всего срока службы детали.

При толщине первого слоя из АМ более $0,85h$ объем твердой смазки, поступающий в пару трения, оказывается недостаточным, что приводит к схватыванию и заеданию контактирующих поверхностей, сопровождающемуся частичным разрушением покрытия, особенно при быстром нагружении пары трения. При толщине первого слоя из АМ менее $0,65h$ значительно возрастает расход АМ и уменьшается срок службы упрочненной детали из-за большой скорости изнашивания покрытия.

При определении величины h_1 меньшие значения принимаются для случая трения без смазочного материала, а большие значения – для граничного трения, а также трения со смазочным материалом. Полученное значение h_1 корректируется таким образом, чтобы превышение антифрикционных слоев над соседними износостойкими соответствовало ближайшему значению высоты регулярной микронеровности по ГОСТ 24773-81.

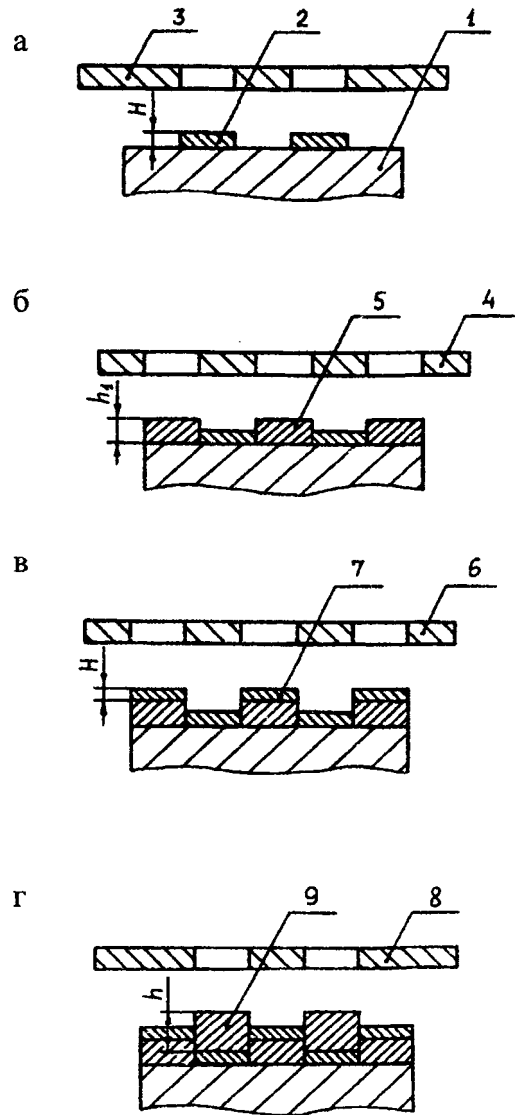


Рис. 4. Схема последовательности получения мультислойного ступенчато-полосчатого покрытия на плоских деталях:
 а – нанесение через экран-маску 3 на основу 1 полос износостойкого материала 2 толщиной H ;
 б – нанесение через экран-маску 4 полос антифрикционного материала 5 толщиной h_1 ;
 в – нанесение через экран-маску 6 полос износостойкого материала 7 толщиной H ;
 г – нанесение через экран-маску 8 полос антифрикционного материала 9 толщиной h

Выполнение каждой из полос покрытия путем многократного последовательного нанесения слоев из ИМ и АМ значительно снижает скорость изнашивания по сравнению с монослойным полосчатым покрытием, а сочетание такого чередования с тем, что из двух любых соседних полос нанесение одной полосы начинают со слоя АМ, а второй – со слоя ИМ, обеспечивает формирование ступенчато-полосчатой конструкции покрытия, которая обладает свойством самовосстанавливаться после изнашивания каждого слоя покрытия.

Свойство самовосстановления заключается в том, что после изнашивания первого слоя покрытия (слои из ИМ и АМ изнашиваются практически одновременно, так как их толщина равна одинаковому числу величин часового износа) конструкция покрытия остается такой же, как и до изнашивания, только на месте износостойкого слоя будет антифрикционный слой и наоборот.

В целом, благодаря стабильному поступлению твердой смазки в пару трения и формированию регулярного микрорельефа на поверхности упрочненной детали, мультислойное ступенчато-полосчатое покрытие, в частности предложенное покрытие (Cu/TiN-TiN/Cu)_x, обеспечивает существенное увеличение износостойкости в условиях трения без смазочного материала или при ограниченном поступлении смазки в пару трения. Кроме того, данное покрытие обеспечивает повышение износостойкости и при трении со смазочным материалом за счет формирования масляных карманов, образующихся при более быстром изнашивании антифрикционных слоев и удерживающих смазку в паре трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. — М.: Машиностроение, 1986. — 192 с.
2. Фролов И.С., Мрочек Ж.А., Иващенко С.А. Повышение триботехнических характеристик деталей из немагнитных материалов нанесением композиционных вакуумно-плазменных покрытий // Материалы международной 53-й науч.-техн. конф. проф., препод., научн. работн. и аспирантов Белорус. госуд. политехн. академии: В 4-х ч. - Минск, 1999. - Ч. 1 - С. 179.
3. Ройх И.Л., Колтунова Л.Н., Федосов С.Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. - М.: Машиностроение, 1976. — 368 с.

УДК 621.91

Чарторийский А. В., Шагун В.И., Руцкий Я.С., Алтунин С.В., Душутин А.В.

ВНЕДРЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ РУПП «БЕЛАЗ»

*ООО «ИТЦ Технополис» Минск, Беларусь
РУПП «Белорусский автомобильный завод», Жодино, Беларусь
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

На территории Республики Беларусь на сегодняшний день представлено достаточно большое количество мировых производителей металлорежущего инструмента.

На наш взгляд, ведущие мировые производители режущего инструмента подошли к некоему пределу качества. И теперь все большее значение приобретает техническая поддержка, то есть способность компании-продавца произвести оптимальный подбор инструмента под конкретные технологические потребности заказчика.

При обработке закаленных материалов лучше подходят пластины наибольшего размера с большим радиусом при вершине. В случае малой жесткости технологической системы подходят шлифованные пластины. Для прерывистого резания или перерезания стружки используют тяжелые пластины из более прочного сплава. При нестабильных условиях работы рекомендуются фрезы с крупным и средним шагом.

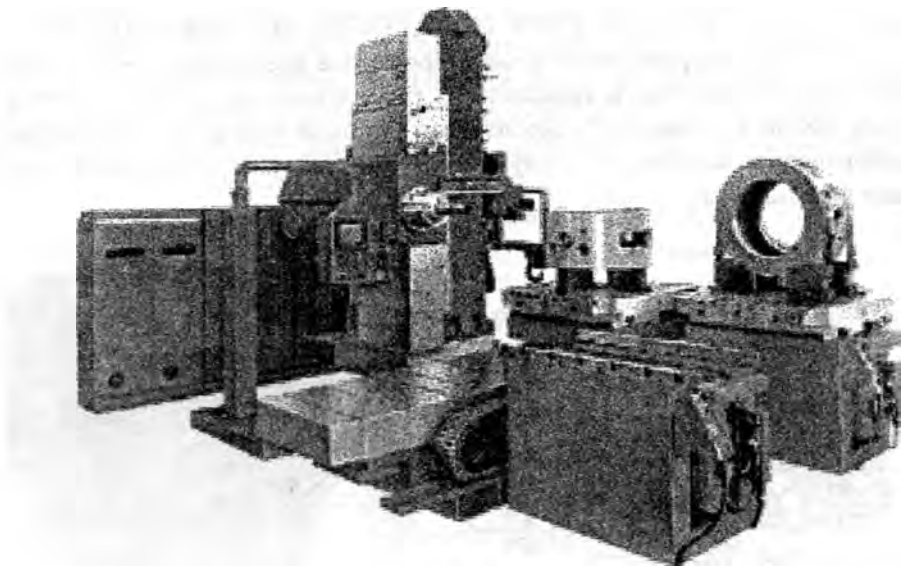


Рис. 1. Горизонтально-расточной станок «Tos Varnsdorf» (Чехия). Модель WHN 110/MC

Наиболее высокое качество может быть достигнуто при скорости резания 300–400 м/мин (что соответствует высокоскоростному фрезерованию), и подаче на оборот, составляющей 70% от длины зачистной кромки фрезы.

На РУПП «БелАЗ» совместно с ООО «ИТЦ Технополис» проведено испытание фрез со сменными неперетачиваемыми пластинами (СНП) фирмы «Pramet» (Чехия) и фирмы «Kennametal» (США-Германия) на изготовленном компанией «Tos Varnsdorf» (Чехия) горизонтально-расточном станке модели WHN 110/MC (рис. 1). Обрабатываемая деталь серийная – крышка шестерен привода, изготовленная из чугуна СЧ20 ГОСТ 1412-85 с твердостью по Бринеллю (НВ) 217...241.

На рубеже 1980-1990 г.г. работники РУПП «БелАЗ» освоили изготовление корпусов торцовых фрез R265.2-160М-10 диаметром 160 мм по чертежам, предоставленным компанией Sandvik. Даная фреза применяется и в настоящее время для обработки крышки шестерен привода на одной из операций. Крепление пластин в корпусе выполнено по типу С (крепление прихватом). Твердосплавную пластину SPKN 1203EDR из сплава 8016, производства фирмы «Pramet» (рис. 2), устанавливают в закрытый паз и базируют по опорной и боковым поверхностям. Таким образом обеспечивается надежность крепления.

Сплав 8016 имеет наноструктурное покрытие $TiCN/Al_2O_3/TiN$ нанесенное методом PVD (физическое осаждение из паровой фазы). Сплав обладает высокой теплостойкостью, что позволяет использовать его для обработки различных материалов без применения СОЖ.



Рис. 2. Фотография сменной неперетачиваемой пластины SPKN 1203EDR

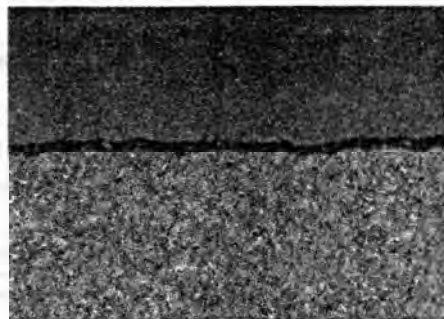


Рис. 3. Микроструктура твердого сплава 8016

Для проведения эксперимента, как альтернатива используемой фрезе, была предложена торцовая фреза диаметром 160 мм

160C12RS450F07A с 12-ю пластинами OFPT 07L6AFSNHB со сплавом KC915M компании «Kennametal» (рис. 4). Данная фреза имеет комбинированное крепление пластин: крепление S (крепление винтом через отверстие) и крепление C (крепление прихватом). Такое крепление позволяет достигать высокой точности базирования и высокой надежности крепления, тем самым позволяет производить высокоскоростную обработку деталей с большими подачами не опасаясь смещения пластин и вибрации.

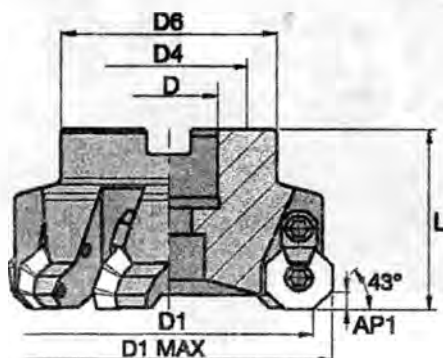


Рис. 4. Фреза компании «Kennametal» 160C12RS450F07A с пластинами OFPT 07L6AFSNHB со сплавом KC915M

Твердый сплав KC915M с многослойным покрытием CVD (химическое осаждение из паровой фазы) TiN/MT TiCN/Al₂O₃ применяется для фрезерования чугуна без применения СОЖ (рис.5).

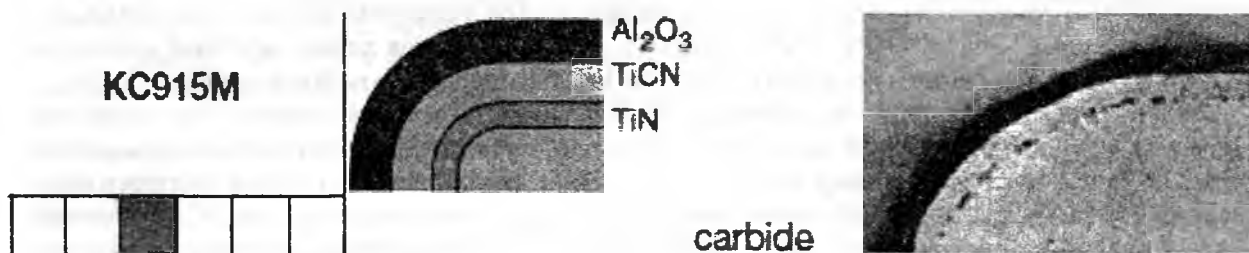


Рис. 5. Микроструктура твердого сплава KC915M. Состав покрытия

Режимы резания были установлены согласно рекомендациям производителей металло-режущего инструмента компаниями «Kennametal» и «Pramet». В зависимости обрабатываемого материала, марки применяемого твердого сплава, условий резания, используемого оборудования и ряду других факторов режимы резания были следующими (табл.1):

Таблица 1 – Первоначальные режимы резания при обработке детали «Крышка шестерен привода»

Наименование исходных данных	«Pramet»	«Kennametal»
Количество проходов	2	2
Скорость резания, V	≈ 150 м/мин	≈ 250 м/мин
Глубина резания, t	по 4,5 мм на каждом проходе	по 4,5 мм на каждом проходе
Подача на зуб, S _z	≈ 0,11 мм/зуб на каждом проходе	≈ 0,14 мм/зуб на каждом проходе

Как видно из таблицы 1, в процессе обработки детали скорость резания фрезами «Kennametal» была почти в 2 раза выше скорости резания фрезами фирмы «Pramet». После об-

работки фрезами «Kennametal» определенного количества деталей высокого качества обработанной поверхности не достигнуто и на пластине было видно разрушение (выкрошивание).

Причиной плохого качества поверхности является износ режущей кромки, а также выкрошивание режущей кромки от несоответствующей подачи или глубины резания для данного материала и условий обработки. Было принято решение прибегнуть к принципам высокоскоростной обработки (ВСО), в частности:

- изменить схему обработки детали на данной операции;
- изменить подачу на каждом проходе;
- увеличить скорость резания.

Окончательно установлены следующие режимы резания (табл. 2).

Таблица 2 – Окончательно установленные режимы резания при обработке детали «Крышка шестерен привода»

Наименование исходных данных	«Pramet»	«Kennametal»
Количество проходов	2	2
Скорость резания, V	≈ 150 м/мин	1-ый проход: ≈ 300 м/мин 2-ой проход: ≈ 350 м/мин
Глубина резания, t	по 4,5 мм на каждом проходе	1-ый проход: 6 мм 2-ой проход: 3 мм
Подача на зуб, Sz	0,12 мм/зуб на каждом проходе	1-ый проход: 0,15 мм/зуб 2-ой проход: 0,08 мм/зуб

Использование фрезы 160C12RS450F07A обеспечило шероховатость обработанной поверхности около Ra 0,63 мкм. Время обработки снижено на данной операции более чем в два раза. При применении фрезы «Pramet» время обработки составило 26 мин, при применении фрезы «Kennametal» – 12 мин.

Увеличение скорости резания и износостойкости фрезы «Kennametal» можно объяснить, вероятно, свойствами покрытий на твердосплавных пластинах. Так как внешним слоем износостойкого покрытия на режущей пластине SPKN 1203EDR из сплава 8016 производства «Pramet» является TiN (нитрид титана). Теплостойкость такого покрытия составляет около 600°C. Пластина OFPT 07L6AFSNHB со сплавом KC915M фирмы «Kennametal» имеет покрытие Al₂O₃ (оксид алюминия), что является оксидной керамикой и имеет температурную стойкость около 1000°C, что позволяет использовать ее при высоких скоростях резания для обработки серого чугуна без применения СОЖ с высокой эффективностью.

По данным РУПП «БелАЗ» эффективность использования фрезы «Kennametal» 160C12RS450F07A с пластинами OFPT 07L6AFSNHB со сплавом KC915M выше, чем применение фрезы «Pramet» R265.2-160M-10 с пластинами SPKN 1203EDR из сплава 8016 при фрезеровании крышки шестерен привода. Годовой доход предприятия РУПП «БелАЗ» от использования фрез фирмы «Kennametal» составляет около 500 млн. рублей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безупречная надежность закрепления сменных пластин для фрезерования. – <http://engine.aviaport.ru/issues/56/page06.html/>.
2. К. Литвиненко. Как выбрать фрезу. // В журнале: «ТехСовет. Путеводитель по эффективным техническим решениям». № 10 (52) – Екатеринбург: 2007.
3. Каталог «Pramet – Фрезерование» – 2006.
4. Каталог «Kennametal – Milling tooling» - 2008.
5. Г.П. Фетисов. Материаловедение и технология металлов/ Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин// М.: Высшая школа, 2002.

РАСЧЁТ НДС РАМЫ БОЛЬШЕГРУЗНОГО САМОСВАЛА С ПОМОЩЬЮ ИНЖЕНЕРНОГО ПАКЕТА ANSYS.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Рама транспортной машины является основным несущим элементом конструкции, который воспринимает все нагрузки, возникающие при движении транспортного средства по дорогам и пересечённой местности. Кроме того, несущая система является основанием для крепления узлов и агрегатов машины, поэтому к ней предъявляют дополнительные требования и её конструктивные формы должны быть подчинены общему компоновочному замыслу [1]. Таким образом, в силовой схеме машины несущему элементу принадлежит одно из ведущих мест. Выход из строя несущего элемента вследствие поломки или необратимой деформации связан с трудоёмкими и дорогостоящими ремонтными работами. И хотя несущая система является главной в силовой схеме машины, её конструктивное оформление не может быть подчинено только требованиям обеспечения прочности и жёсткости конструкции. Расчёт рам на прочность является одной из важнейших задач при проектировании транспортных машин.

В настоящее время для расчёта на прочность механических систем, деталей и механизмов широко используется специализированное программное обеспечение, так называемые CAD/CAE-системы.

CAD-системы предназначены для решения конструкторских задач и оформления конструкторской документации. Современные CAD-системы обладают возможностями как моделирования трёхмерных объектов (деталей и сборок), так и создания на их основе чертежей и текстовой конструкторской документации (спецификаций, ведомостей и т.д.).

CAE-системы представляют собой программное обеспечение, в большинстве своем, основанное на методе конечных элементов, позволяющего решать широкий класс инженерных задач: расчёт на прочность, анализ и моделирование тепловых процессов, расчёт процессов литья и др. В качестве исходных данных в CAE-системах используется трёхмерная геометрическая модель, созданная в CAD-системах.

Для создания трёхмерной модели рамы использовалась программа SolidWorks, широко распространённая программа, позволяющая создавать трёхмерные модели любой сложности.

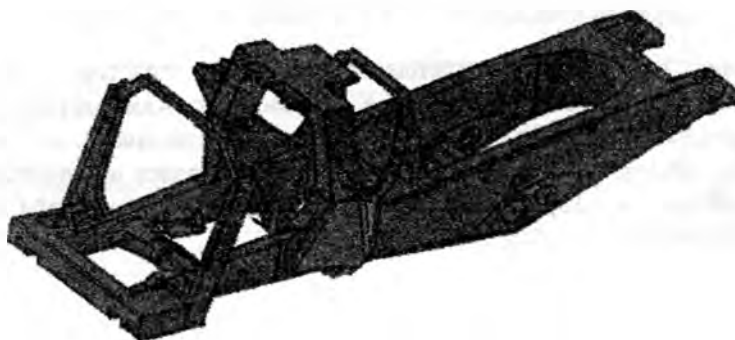


Рис. 1. Трёхмерная модель рамы большегрузного самосвала

Для моделирования задачи использовалась система ANSYS WORKBENCH – одна из самых популярных в мире систем конечно-элементного моделирования, используемая для решения широкого спектра задач.

На сходимость решения и адекватность полученных результатов значительное влияние оказывает размер и форма конечных элементов. Для улучшения качества конечно-элементной сетки геометрически сложные конструкции необходимо условно разбивать на отдельные части, которые будут иметь простую геометрическую форму. Это позволит сделать сетку более ровной и упорядоченной. Раму такого типа, как на рис. 1, необходимо разбить примерно на 900-1000 объёмов. Разбитая на отдельные части рама приведена на рис. 2.

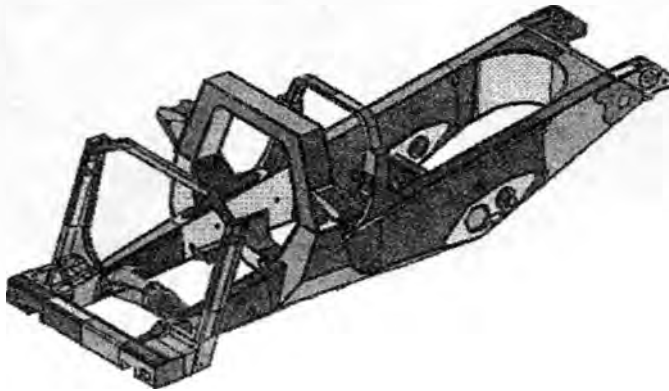


Рис. 2. Трёхмерная модель рамы, разбитая на отдельные части

Исследование крупногабаритных и геометрически сложных конструкций затратное по времени, поэтому расчёт целой рамы не всегда целесообразен. Иногда достаточно рассчитать прочность элементы, которые подвергаются наибольшей нагрузке во время эксплуатации. Одной из наиболее опасных деталей рамы является опора, рассматриваемая далее (рис.3).

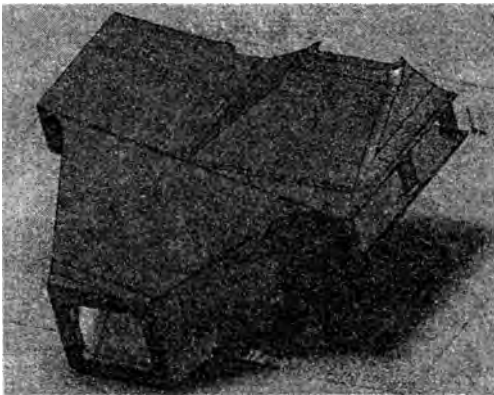


Рис. 3. Трёхмерная модель опоры

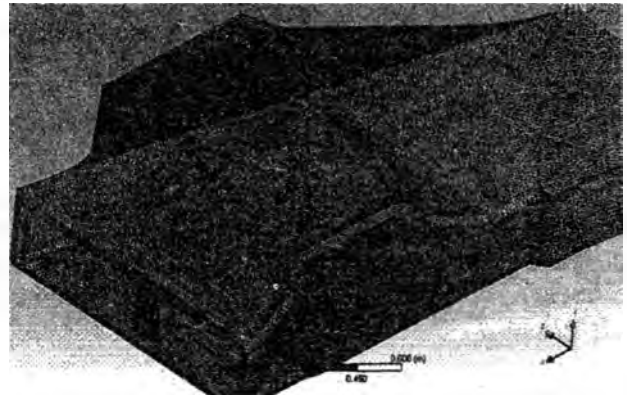


Рис. 4. Конечно-элементная модель опоры

Для задания свойств материала используется линейная изотропная модель. Для стали: модуль упругости $2.1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона 0.23, плотность 7000 кг/м^3 .

На рис. 4 показана конечно-элементная модель, построенная в пакете ANSYS Workbench 12.0. Данная опора имеет довольно сложную геометрию, поэтому построение упорядоченной конечно-элементной сетки, в которой элементы будут иметь форму гексаэдра, что, в данном случае, весьма проблематично, вследствие чего, была построена неупорядоченная сетка с элементами в форме тетраэдра.

В условиях эксплуатации на данный элемент конструкции рамы приходится вес кабины, составляющей не более 20 тонн. На рис. 5 показана схема нагружения и закрепления опоры. Латинскими буквами В, С и D обозначены поверхности приложения закреплений, а к поверхности А прикладываем нагрузку, которую принимает на себя данная часть рамы в процессе эксплуатации самосвала.

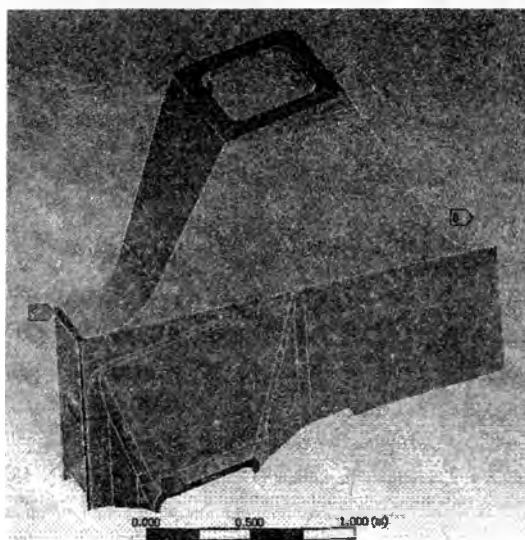


Рис. 5. Схема нагружения

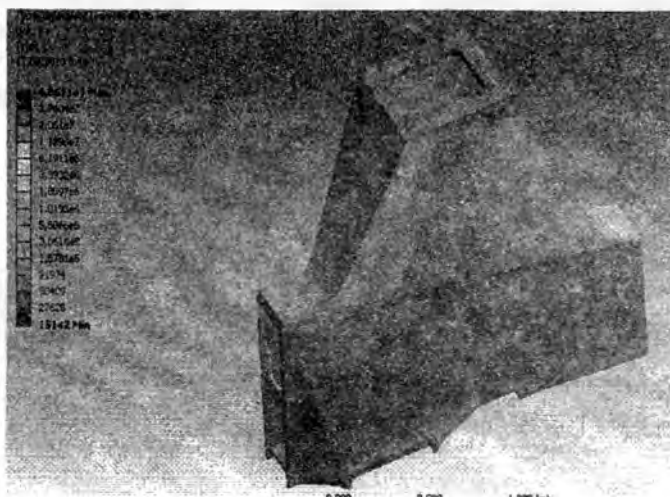


Рис. 6. Распределение напряжений в опоре

Анализ методом конечных элементов показал, что при данной схеме нагружения напряжения в опоре рамы не превышают предел прочности. Модификация не требуется.

Компьютерное моделирование позволяет оценить напряжённо-деформированное состояние в опоре, определить наиболее опасные участки, а затем, при необходимости, внести в неё изменения без дорогостоящих и трудоёмких натурных стендовых испытаний, что немало важно. На рис. 5 показано напряжённое состояние по критерию Мизеса. Также в режиме пост-процессора можно проанализировать деформации, перемещения, усталостные явления, возникающие в раме процессе эксплуатации, и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Б. Проскураков “Динамика и прочность рам и корпусов транспортных машин”. – Л.: Машиностроение, 1972, 2. А. И. Гришкевич “Автомобили. Конструкция, конструирование и расчёт. Системы управления и ходовая часть”, Минск, 1987.3. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. –М: Машиностроение, 2004. -506 с.

УДК 539.3

Василевич Ю.В., Неумержицкая Е.Ю., Галуза И.М.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕРМОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЫ, ОСЛАБЛЕННОЙ ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ ОТВЕРСТИЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Построение общего решения смешанных задач теории упругости и термоупругости для анизотропной плоскости с эллиптическим отверстием, а также решением некоторых конкретных

задач занимались авторы [1,2]. В настоящей работе дается другое представление общих формул, на основании которых получается более простое решение такого класса граничных задач.

Предположим, что анизотропное тело, обладающее прямолинейной упругой и тепловой анизотропией, занимает в комплексной плоскости $z = x + iy$ бесконечную односвязную область \mathcal{D}^- , ограниченную эллипсом \mathcal{L} . Будем считать, что когда тело находится в недеформированном состоянии, оси координат x и y совпадают с полуосями эллипса a и b . При этом будем предполагать, что термоупругое состояние в области \mathcal{D}^- определяется по формулам [2]

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 2\operatorname{Re}[\mu_1^2 \Phi_1(z_1) + \mu_2^2 \Psi_1(z_2)], \\ \sigma_y &= 2\operatorname{Re}[\mu_1 \Phi_1(z_1) + \Psi_1(z_2)], \\ \tau_{xy} &= -2\operatorname{Re}[\mu_1 \Phi_1(z_1) + \mu_2 \Psi_1(z_2)],\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}u &= 2\operatorname{Re}[p_1 \varphi_1(z_1) + p_2 \varphi_1(z_2) + \beta_1 \varphi_0(z_2)], \\ v &= 2\operatorname{Re}[q_1 \varphi_1(z_1) + q_2 \varphi_1(z_2) + \beta_2 \varphi_0(z_2)],\end{aligned}\quad (2)$$

$$\Gamma = \Psi_0(z_2) + \overline{\Psi_0(z_2)},\quad (3)$$

где $z_1 = x + \mu_1 y$; μ_1 , p_1 , q_1 и β_1 - известные коэффициенты [2]; $\varphi_1(z_1) = \int \Phi_1(z_1) dz_1$, $\varphi_1(z_2) = \int \Psi_1(z_2) dz_2$ - комплексные потенциалы, подлежащие определению; $\varphi_0(z_2) = \int \Psi_0(z_2) dz_2$ комплексный потенциал температурного поля Γ будем считать известным; остальные обозначения общеприняты.

Положим, что температура T_∞ и компоненты напряжения σ_x^∞ , σ_y^∞ , τ_{xy}^∞ на бесконечности области ограничены, а функции $\Phi_1(z_1)$, $\Psi_1(z_2)$ и $\Psi_0(z_2)$ голоморфны в \mathcal{D}^- и на бесконечности имеют вид

$$\begin{aligned}\Phi_1(z_1) &= \Gamma + a_0/z_1 + O(1/z_1^2), \\ \Psi_1(z_2) &= \Gamma' + b_0/z_2 + O(1/z_2^2), \\ \Psi_0(z_2) &= 0.5T_\infty + b/z_2 + O(1/z_2^2),\end{aligned}\quad (4)$$

где Γ и Γ' определяются по формулам

$$\begin{aligned}2\operatorname{Re}(\Gamma \mu_1^2 + \Gamma' \mu_2^2) &= \sigma_x^\infty, \\ 2\operatorname{Re}(\Gamma \mu_1 + \Gamma' \mu_2) &= -\tau_{xy}^\infty, \\ 2\operatorname{Re}(\Gamma + \Gamma') &= \sigma_y^\infty,\end{aligned}$$

$$\operatorname{Re}[(q_1 - p_1 \mu_1)\Gamma + (q_2 - p_2 \mu_2)\Gamma'] = \varepsilon_\infty \text{ (заданное на бесконечности вращение);}$$

a_0 , b_0 и b - определены в [2].

Пусть на участках \mathcal{L}' и $\mathcal{L}'' = \mathcal{L} - \mathcal{L}'$ контура \mathcal{L} заданы соответственно смещения u, v и компоненты внешних напряжений X_n, Y_n ; где $\mathcal{L}' = \sum \mathcal{L}_k$ - совокупность непересекающихся дуг $\mathcal{L}_k = a_k b_k$, \mathcal{L}'' -остальная часть контура \mathcal{L} ; X_n и Y_n - проекции внешних напряжений на оси координат x и y , n -нормаль к контуру, направленная в область \mathcal{D}^- . В этом случае граничные условия для функций $\varphi(z_1)$ и $\varphi(z_2)$ на \mathcal{L} можно записать в форме

$$\begin{aligned}2\operatorname{Re}[\varphi_1(z_1) + \varphi_1(z_2)] &= \int_0^S Y_n ds + c_k' \text{ на } \mathcal{L}_k', \\ 2\operatorname{Re}[\mu_1 \varphi_1(z_1) + \mu_2 \varphi_1(z_2)] &= -\int_0^S X_n ds + c_k'' \text{ на } \mathcal{L}_k'',\end{aligned}\quad (5)$$

$$(p_1 + Nq_2) \varphi_1(z_1) + (p_2 + Nq_2) \varphi_1(z_2) + (\overline{p_1} + N\overline{q_1}) \overline{\varphi_1(z_1)} + (\overline{p_2} + N\overline{q_2}) \overline{\varphi_1(z_2)} = g_0 \text{ на } \mathcal{L}', \quad (6)$$

где $g_0 = u + Nu + c_k^0 - (\beta_1 + N\beta_2)\Psi_0(z_2) - (\overline{\beta_1} + N\overline{\beta_2})\overline{\Psi_0(z_2)}$; c_k' и c_k'' - произвольные вещественные постоянные; N - произвольная комплексная постоянная; c_k^0 ($k = 1, 2, \dots, n$) постоянная, принимающая различные значения на разных дугах \mathcal{L}_k ; S -длина дуги на участке контура $\mathcal{L}'_k = b_k a_{k+1}$, принадлежащем \mathcal{L}'' (отсчет дуги S ведется от точек b_k в направлении, при котором область \mathcal{D}^- остается справа).

Применяя функцию $z = R(\xi + m/\xi)$, конформно отображающую область \mathcal{D}^- на область $|\xi| > 1$ (где $\xi = \rho e^{i\theta}$, $R = 0.5(a + b)$, $m = (a - b)/(a + b)$), соотношения (5), (6), после дифференцирования их по θ , преобразуем к виду

$$\begin{aligned} 2\operatorname{Re}[\Phi(\sigma) + \Psi(\sigma)]i &= f_2 \text{ на } \gamma'', \\ 2\operatorname{Re}[\mu_1 \Phi(\sigma) + \mu_2 \Psi(\sigma)]i &= f_2 \text{ на } \gamma'', \end{aligned} \quad (7)$$

$$(p_1 + Nq_1) \Phi(\sigma) + (p_2 + Nq_2) \Psi(\sigma) - (\overline{p_1} + N\overline{q_1}) \overline{\Phi(\sigma)} - (\overline{p_2} + N\overline{q_2}) \overline{\Psi(\sigma)} = g \text{ на } \gamma', \quad (8)$$

где $g = -i \frac{a}{2b} (u + Nu) - (\beta_1 + N\beta_2)\Psi_*(\sigma) + (\overline{\beta_1} + N\overline{\beta_2})\overline{\Psi_*(\sigma)}$; γ' и γ'' - участки контура γ_0 ($|\xi| = 1$), соответствующие \mathcal{L}' и \mathcal{L}'' на контуре \mathcal{L} , $\sigma = e^{i\theta}$, $\Phi(\sigma) = \sigma \omega'_1(\sigma) \Phi_1[\omega_1(\sigma)]$, $\Psi(\sigma) = \sigma \omega'_2(\sigma) \Psi_2[\omega_2(\sigma)]$, $\Psi_*(\sigma) = \sigma \omega'_2(\sigma) \Psi_0[\omega_2(\sigma)]$,

$$\begin{aligned} f_1 &= -0.5[(\tau_{p\theta} - i\sigma_p)\sigma\omega'(\sigma) + (\tau_{p\theta} + i\sigma_p)\overline{\sigma\omega'(\sigma)}], \\ f_2 &= 0.5[(\sigma_p + i\tau_{p\theta})\sigma\omega'(\sigma) + (\sigma_p - i\tau_{p\theta})\overline{\sigma\omega'(\sigma)}], \\ z_1 &= \omega_1(\xi) = 0.5[(1 - i\mu_1)\omega(\xi) + (1 + i\mu_1)\omega(1/\xi)], \end{aligned}$$

σ_p и $\tau_{p\theta}$ - компоненты внешних нормальных и касательных напряжений на контуре \mathcal{L}'' . При этом будем предполагать, что функции f_k и g удовлетворяют условию Гельдера на γ_0 , а потенциалы $\Phi(\xi)$ и $\Psi(\xi)$ в точках $\sigma = \alpha'_k$ и $\sigma = \beta'_k$, соответствующих концам дуг $\mathcal{L}_k = a_k b_k$, имеет интегрируемые особенности.

Условием (7) удовлетворим, если положить

$$\begin{aligned} i[\Phi(\xi) + \Psi(\xi)] &= 0.5[J_1(\xi) - \overline{J_1(1/\xi)}] + iB_0, \\ i[\mu_1 \Phi(\xi) + \mu_2 \Psi(\xi)] &= 0.5[J_2(\xi) - \overline{J_2(1/\xi)}] - k_0 A_0 + i n_0 B_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $J_k(\xi) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma''} \frac{f_k d\sigma}{\sigma - \xi}$, $k=1, 2$; $A_0 = F(\xi) - \overline{F(1/\xi)}$, $B_0 = F(\xi) + \overline{F(1/\xi)}$, k_0, n_0 - произвольные вещественные постоянные, $F(\xi)$ - произвольная кусочно-голоморфная функция, удовлетворяющая на γ'' условию $F^+(\sigma) = F^-(\sigma)$. Знаками (+) и (-) вверху справа у символов функций обозначаются значения функций на γ_0 со стороны областей S^+ ($|\xi| < 1$) и S^- ($|\xi| > 1$) соответственно.

При удовлетворении условиям (7) необходимо учесть, что $\overline{\varphi(1/\xi)} = \overline{\varphi(1/\xi)} = \overline{\varphi^+(\sigma)}$ на γ_0 , $\operatorname{Re} \overline{\varphi^+(\sigma)} = \operatorname{Re} \varphi^+(\sigma)$, $\operatorname{Im} \overline{\varphi^+(\sigma)} = -\operatorname{Im} \varphi^+(\sigma)$, где $\varphi(\xi)$ - любая из функций $J_k(\xi)$, $F(\xi)$.

Из (9) находим

$$\Phi(\xi) = \varphi_0 + a_1 A_0 + b_1 B_0, \quad \Psi(\xi) = \varphi'_0 + a_2 A_0 + b_2 B_0, \quad (10)$$

где $a_1 = ik_0/(\mu_1 - \mu_2)$, $a_2 = -a_1$, $b_1 = (n_0 - \mu_2)/(\mu_1 - \mu_2)$, $b_2 = (n_0 - \mu_1)/(\mu_1 - \mu_2)$; φ_0 и φ'_0 - известные функции, зависящие от $J_k(\xi)$, $\overline{J_k(1/\xi)}$. В дальнейшем будем считать $\varphi_0 = \varphi'_0 = 0$, считая тем самым $\sigma_p = \tau_{p\theta} = 0$ на γ'' , и положим, что искомые коэффициенты k_0 и n_0 выражаются через некоторый произвольный параметр λ в виде

$$k_0 = i(\lambda - \bar{\lambda})/2, \quad n_0 = (\lambda + \bar{\lambda})/2.$$

Подставим (10) в (6) и приравняем нулю коэффициенты при $F^+(\sigma)$ и $F^-(\sigma)$. В результате получим граничное условие для функции $F(\xi)$

$$zF^-(\sigma) + F^+(\sigma) = g\mu_0$$

и два уравнения, на основании которых следует

$$N = -\frac{p_1(a_1 - b_1) + p_2(a_2 - b_2)}{q_1(a_1 - b_1) + q_2(a_2 - b_2)} = \frac{p_1(\bar{a}_1 + \bar{b}_1) + p_2(\bar{a}_2 + \bar{b}_2)}{q_1(\bar{a}_1 + \bar{b}_1) + q_2(\bar{a}_2 + \bar{b}_2)}$$

Отсюда для определения k_0 и n_0 имеем уравнение

$$\lambda^2 m_1 - \lambda[(\mu_2 + \bar{\mu}_2)a_0 + c_0(\bar{\mu}_2 + \mu_2) - \bar{c}_0(\bar{\mu}_2 + \mu_1) + b_0(\bar{\mu}_1 + \mu_1)] + \mu_2 \bar{\mu}_2 a_0 + \bar{\mu}_1 \mu_2 c_0 - \mu_1 \bar{\mu}_2 \bar{c}_0 + b_0 \mu_1 \bar{\mu}_1 = 0 \quad (11)$$

если учесть, что между коэффициентами a_k и b_k имеют место зависимости

$$a_2 + b_2 = -(a_1 + b_1) + 1, \quad a_2 - b_2 = -(a_1 - b_1) - 1.$$

Здесь приняты обозначения

$$\begin{aligned} m_1 &= a_0 + b_0 + c_0 - \bar{c}_0, \quad a_0 = p_1 \bar{q}_1 - q_1 \bar{p}_1, \quad b_0 = p_2 \bar{q}_2 - q_2 \bar{p}_2, \quad c_0 = q_1 \bar{p}_2 - p_1 \bar{q}_2; \\ z &= (a_1 + b_1)(p_1 + Nq_1) + (a_2 + b_2)(p_2 + Nq_2) \mu_0, \\ \mu_0 &= [(a_1 - b_1)(\bar{p}_1 + Nq_1) + (a_2 - b_2)(\bar{p}_2 + Nq_2)]^{-1}. \end{aligned}$$

Из (11) определим значение λ (которое соответствует $\lambda = i$ при предельном переходе к изотропному телу)

$$\lambda = \frac{1}{2m_1} [a_0(\mu_2 + \bar{\mu}_2) + c_0(\bar{\mu}_1 + \mu_2) - \bar{c}_0(\mu_1 + \bar{\mu}_2) + b_0(\bar{\mu}_1 + \mu_1) + \{[a_0(\mu_2 + \bar{\mu}_2) + c_0(\bar{\mu}_1 + \mu_2) - \bar{c}_0(\mu_1 + \bar{\mu}_2) + b_0(\bar{\mu}_1 + \mu_1)]^2 - 4m_1(\mu_2 \bar{\mu}_2 a_0 + \bar{\mu}_1 \mu_2 c_0 - \mu_1 \bar{\mu}_2 \bar{c}_0 + b_0 \mu_1 \bar{\mu}_1)\}^{1/2}]$$

В соответствии с (4) будем считать, что при $\xi \rightarrow 0$ и $|\xi| \rightarrow \infty$

$$F(\xi) = a_\infty + c_\infty \xi + O(1/\xi), \quad \bar{F}(\xi) = a_0 + c_0/\xi + O(\xi), \quad (12)$$

где a_∞, c_∞, a_0 и b_0 - произвольные постоянные.

При $\varphi_0 = \varphi'_0 = 0$ из (10) имеем

$$\begin{aligned} \Phi_1(z_1) &= [(\bar{\lambda} - \mu_2)F(\xi) + (\lambda - \mu_2)\bar{F}(1/\xi)] / \xi \omega'_1(\xi)(\mu_1 - \mu_2), \\ \Psi_1(z_2) &= [(\mu_1 - \bar{\lambda})F(\xi) - (\lambda - \mu_1)\bar{F}(1/\xi)] / \xi \omega'_2(\xi)(\mu_1 - \mu_2). \end{aligned} \quad (13)$$

Принимая во внимание, что $z_1 = 0.5(a - i\mu_1 b)\xi + O(1/\xi)$ для больших $|\xi|$, из формул (12), (13) следует

$$\Phi_1(z_1) = \left[\frac{2c_{\infty}(\bar{\lambda}-\mu_2)+2c_{\infty}^-(\lambda-\mu_2)}{a-i\mu_1 b} + \frac{a_{\infty}(\bar{\lambda}-\mu_2)+\bar{a}_{\infty}(\lambda-\mu_2)}{z_1} \right] (\mu_1 - \mu_2)^{-1} + 0 \left(\frac{1}{z_1^2} \right), \quad (14)$$

$$\Psi_1(z_{12}) = \left[-\frac{2c_{\infty}(\bar{\lambda}-\mu_1)+2c_{\infty}(\bar{\lambda}-\mu_1)}{a-i\mu_2 b} - \frac{a_{\infty}(\bar{\lambda}-\mu_1)+\bar{a}_{\infty}(\lambda-\mu_1)}{z_2} \right] (\mu_1 - \mu_2)^{-1} + 0 \left(\frac{1}{z_2^2} \right)$$

Сравнивая правые части (4) и (14), получим соотношения для определения $a_{\infty}, c_{\infty}, a_{\infty}, c_{\infty}$.

$$\frac{(\lambda-\mu_2)c_{\infty}+c_{\infty}(\bar{\lambda}-\mu_2)}{0.5(a-i\mu_1 b)} = (\mu_1 - \mu_2)\Gamma, \quad a_{\infty}(\bar{\lambda}-\mu_2) + \bar{a}_{\infty}(\lambda-\mu_2) = (\mu_1 - \mu_2)a_0, \quad (15)$$

$$\frac{2c_{\infty}(\mu_1-\bar{\lambda})-2c_{\infty}(\lambda-\mu_1)}{a-i\mu_2 b} = (\mu_1 - \mu_2)\Gamma', \quad a_{\infty}(\mu_1 - \bar{\lambda}) - \bar{a}_{\infty}(\lambda - \mu_1) = (\mu_1 - \mu_2)b_0.$$

Определив функцию $F(\xi)$, компоненты напряжения σ_p и $\tau_{p\theta}$ на \mathcal{L} найдем по формулам (7) с учетом (10)

$$\sigma_p = \frac{4}{\omega'(\sigma)\omega'(\bar{\sigma})} \operatorname{Re}[c_1 \Phi(\sigma) + c_2 \Psi(\sigma)], \quad \tau_{p\theta} = -\frac{4}{\omega'(\sigma)\omega'(\bar{\sigma})} \operatorname{Re}[c'_1 \Phi(\sigma) + c'_2 \Psi(\sigma)],$$

где $c_j = [\omega'(\sigma)\sigma(1-i\mu_j) + \overline{\omega'(\bar{\sigma})}\bar{\sigma}(1+i\mu_j)]$, $c'_j = [\omega'(\sigma)\sigma(1+\mu_j) + \overline{\omega'(\bar{\sigma})}\bar{\sigma}(1-\mu_j)]$, $j=1,2$.

Учитывая, что $\sigma_p + \sigma_{\theta} = \sigma_x + \sigma_y$ для определения σ_{θ} на \mathcal{L} имеем выражение

$$\sigma_p + \sigma_{\theta} = 2\operatorname{Re}\left\{ \left[\frac{(1+\mu_1^2)(\bar{\lambda}-\mu_2)}{(\mu_1-\mu_2)\sigma\omega'_1(\bar{\sigma})} + \frac{(1+\mu_2^2)(\mu_1-\bar{\lambda})}{(\mu_1-\mu_2)\sigma\omega'_2(\bar{\sigma})} \right] F^-(\sigma) + \left[\frac{\sigma}{\mu_1-\mu_2} \left(\frac{(1+\mu_1^2)(\bar{\lambda}-\mu_2)}{\omega'_1(\bar{\sigma})} - \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. - \frac{(1+\mu_2^2)(\bar{\lambda}-\mu_1)}{\omega'_2(\bar{\sigma})} \right) \right] F^+(\sigma) \right\}$$

Таким образом, исходя из заданных граничных условий, на основе приведенных формул определяют комплексные потенциалы, являющиеся основой расчета компонент напряжений и деформаций в анизотропной пластине с эллиптическим отверстием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попович Б.И., Грилицкий Д.В. Термоупругое состояние анизотропной пластинки с эллиптическим отверстием при смешанных граничных условиях. Прикладная механика, т. IX, вып. 6, 1973. 2. Прусов И.А. Некоторые задачи термоупругости. Издательство БГУ, Мн., 1975

ТЕОРИЯ НЕГОМОГЕННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АМОРФНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Разработана квазидислокационная теория негомогенной пластической деформации твердых тел. На основании теории проведен расчет полей напряжений у полосы сдвига – основного канала негомогенной пластичности конденсированных систем, не имеющих в структуре дальнего порядка. Показан путь использования полученных результатов в решении задач механики деформируемых твердых тел с учетом особенностей реакции на внешнее деформирование, оказываемых аморфными материалами.

В теории пластической деформации аморфных материалов дислокационный подход широко использовался, но для случая гомогенной пластической деформации, распределенной в объеме аморфного материала [1]. В случае негомогенной пластической деформации, локализованной в тонкой полосе сдвига, дислокационный подход еще не нашел широкого применения [2].

Целью данной работ стала разработка квазидислокационной теории негомогенной пластической деформации аморфных материалов и применение этой теории для решения задач механики деформируемого твердого тела.

Под квазидислокацией будем подразумевать такой объект, который в изотропной и однородной среде обладает всеми свойствами дислокаций, но реально не существует и вводится для удобства математических расчетов напряженного состояния у полос сдвига. Такой подход уже использовался ранее при введении таких квазичастиц, как фононы, которые реально не существуют, но их введение очень удобно для математического описания тепловых свойств твердых тел.

На рис. 1 представлено схематическое изображение полосы сдвига в аморфном материале с позиций мезоскопической модели цепочек квазидислокаций.

Поля напряжений у полосы сдвига согласно данной модели могут быть рассчитаны по формуле

$$\sigma_{ij} = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \sigma_{ij}(x + nd + m(1 + Nd), y),$$

где $M = L_{\text{пс}} / (L + l)$ (здесь $L_{\text{пс}}$ – длина полосы сдвига) – число пор; $N = L/d$ (d – расстояние между квазидислокациями в скоплении) – число квазидислокаций в скоплении; m и n – индексы суммирования.

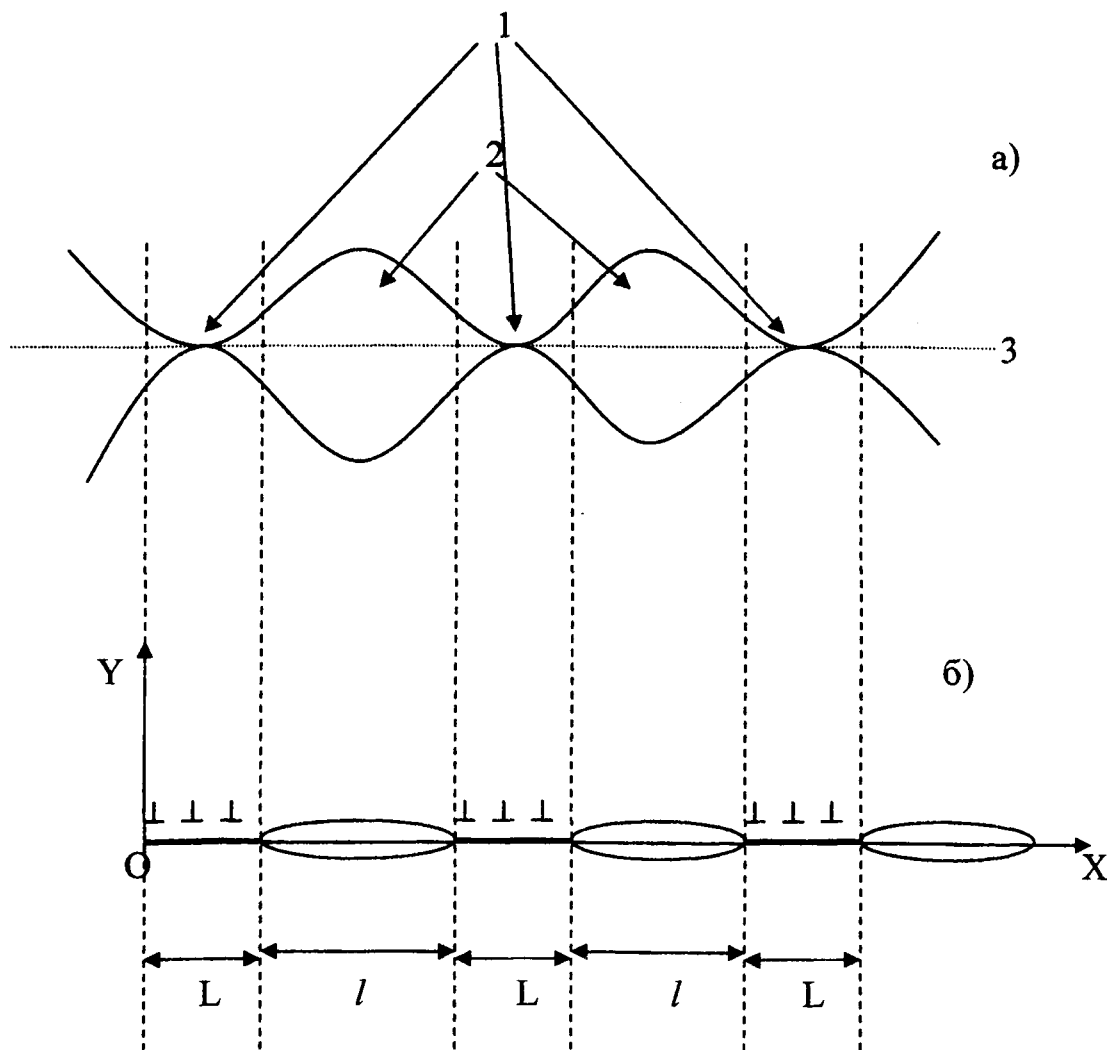


Рис. 1. Полоса сдвига:
 а) схематическое изображение; б) дислокационная модель
 полосы сдвига; 1 – места сцепления частей материала, находящихся по разные стороны плоскости сдвига;
 2 – поры; 3 – плоскость сдвига

Модель цепочек квазидислокаций применима не ко всем типам полос сдвига, появляющимся в деформируемом аморфном материале [3]. Поэтому правомерно использование и модели квазидислокационных стенок. Схематически изображение полосы сдвига в рамках этой модели показано на рис. 2.

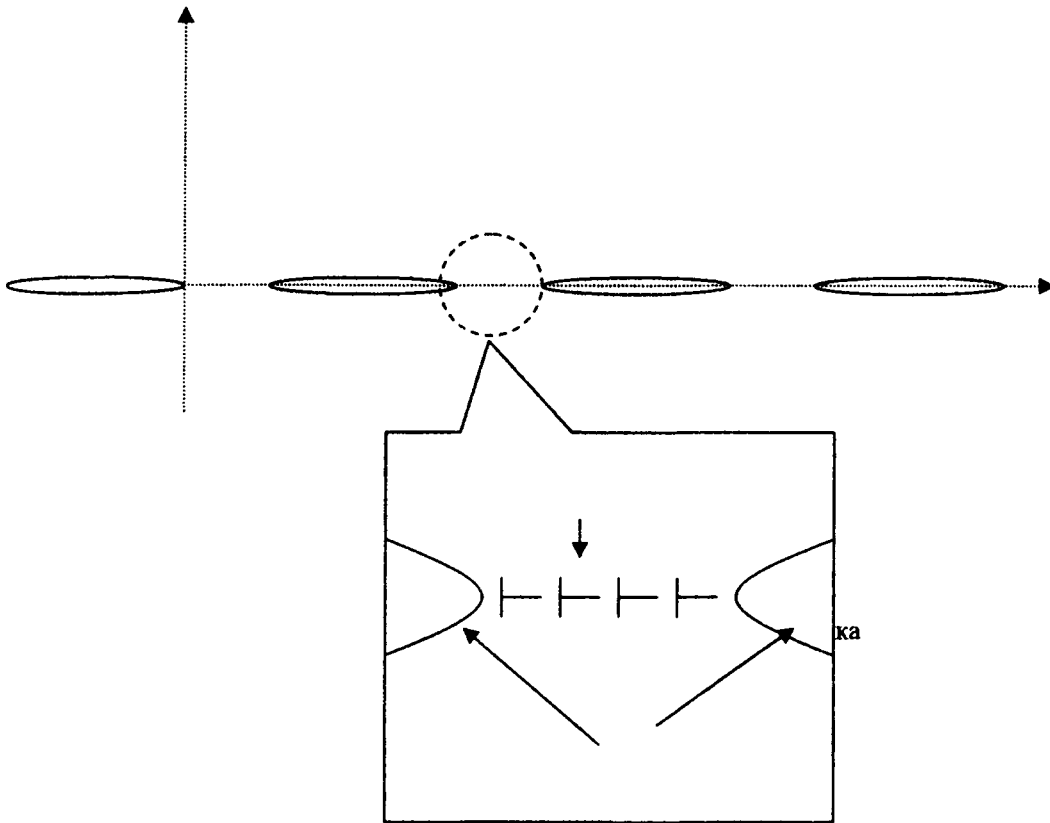


Рис. 2. Модель чередующихся квазидислокационных стенок полосы сдвига в аморфном материале

Целесообразно также использовать и подход Билби-Коттрелла-Свиндена, согласно которому полоса сдвига может быть представлена в виде, показанном на рис. 3.

В работе проведены расчеты полей напряжений у полос сдвига на основании этих моделей. Установлено, что напряжения локализованы у полосы сдвига и в некотором (порядка 100 мкм при длине полосы сдвига 300 мкм) удалении от ее средней части.

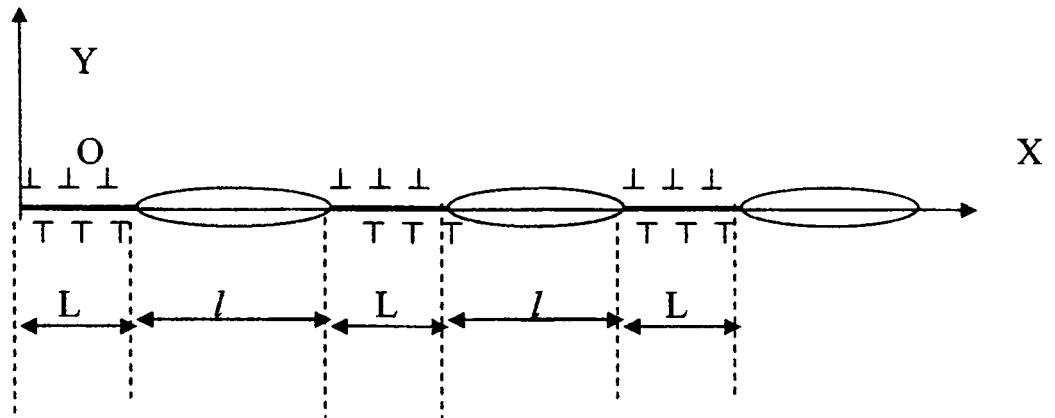


Рис. 3. Квазидислокационная модель полосы сдвига, построенная на основании подхода Билби-Коттрелла-Свиндена

Разработана макроскопическая квазидислокационная модель полосы сдвига в аморфном материале. Схематическое изображение полосы сдвига в рамках данной модели показано на рис. 4.

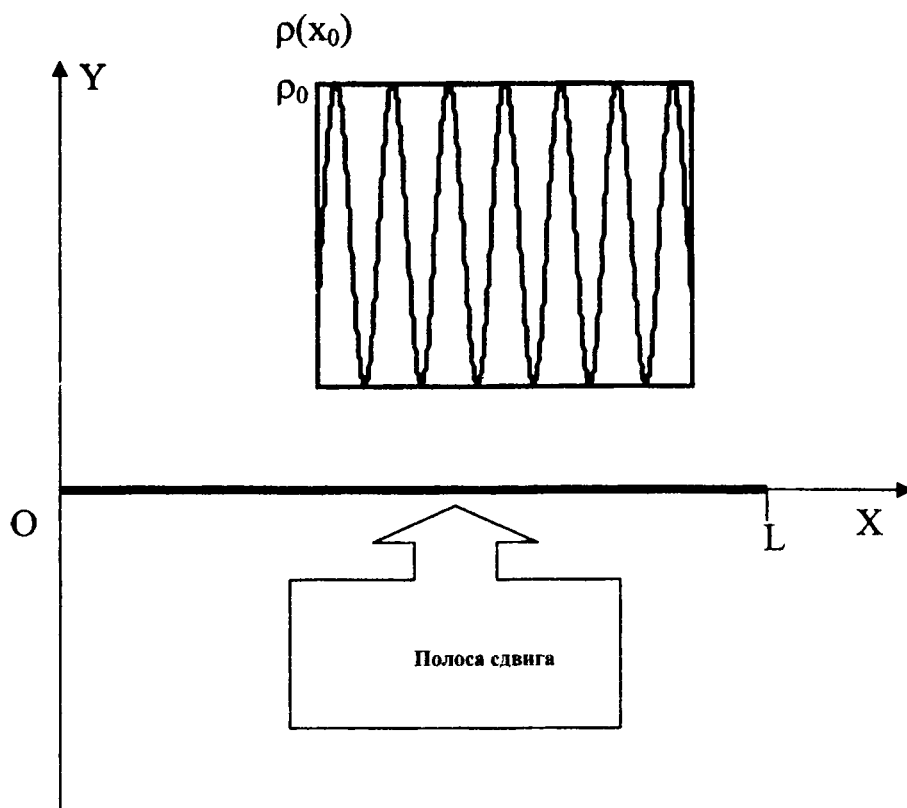


Рис. 4. След полосы сдвига в плоскости XOY.
Схематическое изображение функции плотности распределения квазидислокаций вдоль полосы сдвига

Расчет напряжений у полосы сдвига в рамках этой модели осуществлялся с помощью формулы

$$\sigma_{ij}(x, y) = \int_0^L \sigma_{ij}^0(x, y, x_0) \rho(x_0) dx_0,$$

где L – длина полосы сдвига; $\sigma_{ij}^0(x, y)$ – компоненты тензора напряжений, создаваемых единичной дислокацией, и определяемые по формулам

$$\sigma_{xx}^0 = -\frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1-\nu)} \frac{y[3(x-x_0)^2 + y^2]}{[(x-x_0)^2 + y^2]^2},$$

$$\sigma_{yy}^0 = \frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1-\nu)} \frac{y[(x-x_0)^2 - y^2]}{[(x-x_0)^2 + y^2]^2},$$

$$\sigma_{xy}^0 = \frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(x-x_0)[(x-x_0)^2 - y^2]}{[(x-x_0)^2 + y^2]^2},$$

$$\sigma_{zz}^0 = -\frac{\mu b_{kp} \nu}{\pi(1-\nu)} \frac{y}{(x-x_0)^2 + y^2},$$

$$\sigma_{xx}^0 = -\frac{\mu b_e}{2\pi} \frac{y}{(x-x_0)^2 + y^2},$$

$$\sigma_{zy}^0 = -\frac{\mu b_e}{2\pi} \frac{x-x_0}{(x-x_0)^2 + y^2}.$$

В частном случае плотность квазидислокаций может рассматриваться изменяющейся по гармоническому закону

$$\rho(x_0) = \frac{\rho_0}{2} \left(\cos\left(\frac{2\pi x_0}{l_0}\right) + 1 \right),$$

где ρ_0 – максимальная плотность квазидислокаций; l_0 – период. Вид функции $\rho(x_0)$ представлен на рис. 4. Результат расчета напряжений показан на рис. 5.

С использованием расчетных соотношений для компонент тензора напряжений для полос сдвига могут решаться задачи механики деформируемого твердого тела [4] при различных способах деформирования аморфного материала.

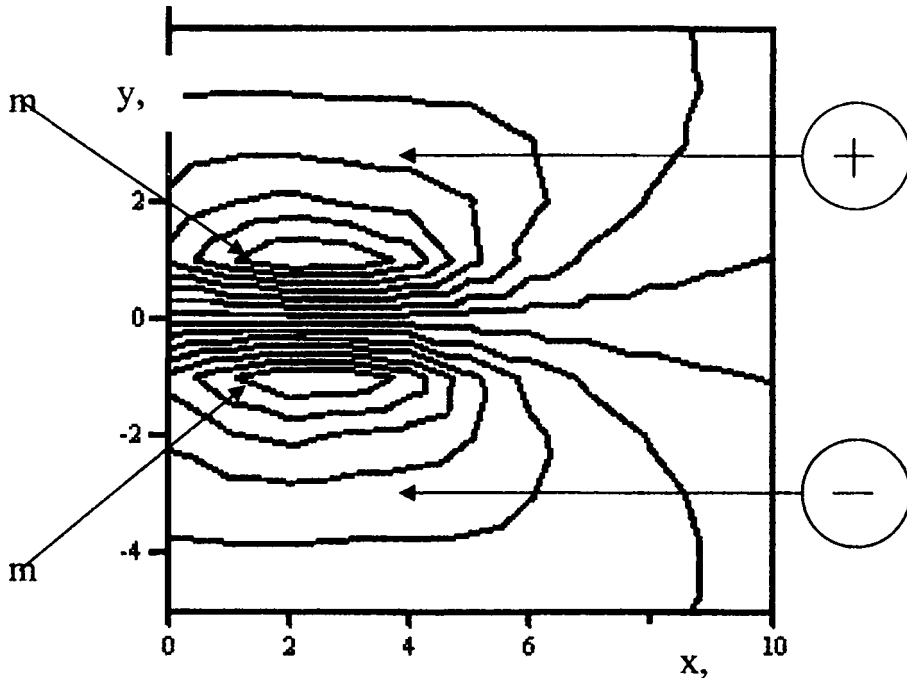


Рис. 5. Распределение напряжений σ_{xx} у полосы сдвига.

Принималось: $L=5$ мкм; $l=3$ мкм; $\rho_0=5$ мкм⁻¹

Таким образом, разработаны квазидислокационные модели полос сдвига, основного канала неомогенной пластической деформации аморфных материалов, при этом предложены следующие модели: а) модель чередующихся цепочек квазидислокаций; б) модель чередующихся квазидислокационных стенок; в) модель, основанная на подходе Билби-Коттрелла-Свиндена и г) макроскопическая квазидислокационная модель. На основании квазидислокационных моделей рассчитаны поля напряжений у полос сдвига и установлено, что область локализации напряжений находится не только у полосы сдвига, но и в определенном удалении от нее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глезер, А.М. Структура и механические свойства аморфных сплавов / А.М. Глезер, Б.В. Молотилов. – М.: Металлургия, 1992. – 208 с.
2. Верещагин, М.Н. Негомогенная пластическая деформация аморфных сплавов на основе железа: монография / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков. – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2004. – 134 с.
3. Верещагин, М.Н. Особенности пластической деформации при indentировании пирамидой Виккерса поверхности аморфного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Физика металлов и металловедение. – 2002. – Т. 93. – №5. – С. 101–104.
4. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.

УДК 539

Дикан Ж.Г., Ларченков Л.В.

МЕХАНИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРУКТУР

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Как наука механика композиционных структур (материалов) зародилась сравнительно недавно, хотя идея использования композиций структурных элементов металлов, керамики, стекла, полимеров и т.д. для получения структур с уникальными свойствами известна давно. Сама природа использовала принцип такой комбинации, например, костей (хрупкая структура апатит – минерал из группы фосфорнокислых соединений кальция, содержащий переменное количество фтора и хлора, – связанный прочным мягким белковым веществом) и древесины (волокна целлюлозы, обеспечивающие механическую прочность и эластичность растительных тканей, связанные лигнином, обеспечивающим одревеснение клеток целлюлозы, увеличивая их прочность). В настоящее время широко применяются следующие структуры: железобетон, прозрачный бетон, стеклопластик, биметаллы, графито- и борозпоксиды.

Важным преимуществом композиционной структуры является её высокая прочность на единицу массы. При этом по своим прочностным и тепловым качествам многие композиционные структуры превосходят любой из своих структурных элементов или резко отличаются от него.

Наряду с многими технически важными преимуществами композиционные структуры обладают также недостатками, которые связаны с тем, что физико-механические и химические свойства компонентов структур оказываются не согласованными, а это приводит к специфическим видам разрушения (расслоение, местные разрывы, когезии и т.п.). В связи с этим, при создании математических моделей различных структур эти особенности порождают большие трудности, которые остаются ещё неизученными.

Композиционную структуру можно рассматривать как неоднородную среду. К таким структурам относятся поликристаллические Среды и многоэлементные стохастические смеси (когда все структурные элементы смеси равноправны), а также матричные смеси (когда в композиционной структуре выделяется матрица, а все остальные компоненты считаются включениями). Сюда можно отнести и однородные структуры с пустотами (последние трактуются как включения с равными нулю модулями упругости). Выбор метода описания такой неоднородной Среды зависит от формы и взаимного расположения структурных элементов. Очень часто в пространственном распределении неоднородностей имеется определённый порядок, и тогда говорят о регулярных структурах; если имеются небольшие нарушения этого порядка, то структуры называют квазирегулярными. Каждый из структурных элементов неоднородной структуры может обладать различными механическими характеристиками: упругими, вязкоупругими, пластическими и др. Описание таких неоднородных структур связано с большими математическими трудностями.

До недавнего времени основное содержание работ по механике композиционных структур состояло в сведении задачи неоднородной (чаще всего изотропной) теории упругости к задаче однородной анизотропной теории. Это достигалось введением различных модулей, которые либо вычислялись различными методами (стахостическими или детерминированными), либо определялись экспериментально как средние модули структуры в целом [1, 2, 3, 4].

В данном случае композиционные структуры – это металлические или неметаллические матрицы (основы) с заданным расположением в них упрочнителей (волокон, дисперсных частиц и др.), при этом эффективно используются индивидуальные свойства структурных элементов композиции.

По характеру композиционные структуры подразделяются на :

- волокнистые, упрочнённые непрерывными волокнами и нитевидными кристаллами;
- дисперсноупрочнённые структуры, полученные путём введения в металлическую матрицу дисперсных частиц упрочнителей;
- слоистые структуры, созданные путём прессования, прокатки или сварки взрывом разнородных материалов.

Структуру следует понимать как строение какого-либо материала с определёнными устойчивыми взаимосвязями, его составляющих структурных элементов, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе, то есть сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях [5, 6, 7].

По характеру структуры (в нашем понимании, например, сплав в твёрдом или жидком состоянии) строение металла можно наблюдать невооружённым глазом или при небольшом увеличении.

Различают макро- и микроструктуру материалов. В разрезе металлического образца можно наблюдать присутствие и распределение в его объёме раковин, пор, неметаллических включений, дефектов, а также расположение и форму крупных зёрен.

Комбинируя в расплавах объёмное содержание компонентов, можно, в зависимости от назначения, получать структуры с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также создавать композиции с необходимыми магнитными диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами.

Волокнистые композиционные структуры, армированные нитевидными кристаллами и непрерывными волокнами тугоплавких соединений и структурных элементов (SiC, Al₂O₃, бор, углерод и др.), являются новым классом материалов.

Виды и применение композиционных структур.

Принципы упрочнения известны в технике с глубокой древности. Ещё в Вавилоне использовали тростник для армирования глины при постройке жилищ, а в Древней Греции железными прутьями укрепляли мраморные колонны при постройке дворцов и храмов. В 1555–1560 годах при постройке Храма Василия Блаженного в Москве русские зодчие Барма и Постник использовали армированные железными полосами каменные плиты. Прообразом двойных композиционных структур является широко известный железобетон, представляющий собой сочетание бетона, работающего на сжатие, и стальной арматуры, работающей на растяжение, а также полученные в 19 веке прокаткой слоистые материалы. Армирование можно производить таким методом. Армирование можно производить таким методом, как сварка взрывом, соединяющим различные по прочностным свойствам структуры по всей площади отдельных элементов независимо от их механических характеристик.

Развитию современных композиционных структур содействовали: разработка и применение в конструкциях волокнистых стеклопластиков, обладающих высокой удельной прочностью (1940-1950 годы); открытие весьма высокой прочности, приближающейся к теоретически возможной, нитевидных кристаллов и доказательства возможности использования их для упрочнения металлических и неметаллических структур (1950-1960 годы); разработка новых армированных материалов - высокопрочных и высокомодульных непрерывных волокон бора, углерода, карбидов кремния (SiC) и алюминия (Al₄C₃) и волокон других неорганических тугоплавких соединений, а также упрочнителей на основе металлов (1960-1970 годы).

В технике широкое распространение получили волокнистые композиционные структуры, армированные высокопрочными и высокомодульными непрерывными волокнами, в кото-

рых армирующие структурные элементы несут основную нагрузку, тогда как матрица передаёт напряжение волокнам. Волокнистые композиционные структуры анизотропные. Механические свойства их представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические свойства композиционных структур

Матрица	Упрочнитель (волокно)		Плотность, кг/м ³	Прежель-прочность Гн/м ²	Удельная прочность кн м/кг	Модуль упругости Гн/м ²	Удельн.модуль упруг. Мн/м ²
	Материал	% (объём)					
Никель	Вольфрам	40	12500	0,8	64	265	21,2
	Молибден	50	9300	0,7	75	235	12,25
Титан	Карбон.кремн	25	4000	0,9	227	210	52
Алюмини	Борное волок.	45	2600	1,1	420	240	100
	Сталь, провол.	25	4200	1,2	280	105	23,4
Магний	Борное волок.	40	2000	1,0	500	220	110
Полимерн. связующее	Углерод. волок.	50	1600	1,18	737	168	105
	Борное волокн	60	1900	1,4	736	260	136,8

Диаметр непрерывных волокон углерода, бора, тугоплавких соединений (B₄C₃, SiC и др.) обычно составляет 100 - 150 мкм. Волокнистые композиционные структуры, в отличие от монолитных сплавов, обладают высокой усталостной прочностью σ_{-1} . Так, например, σ_{-1} (база 10⁷ циклов) алюминиевых сплавов составляет 130–150 Мн/м² (130–150 МПа), в то время как у армированного борным волокном алюминиевой композиционной структуры σ_{-1} около 500 МПа при той же базе. Предел прочности σ_B и модуль упругости E композиционной структуры на основе алюминия, армированного борным волокном, примерно в 2 раза больше, чем алюминиевых сплавов В-95 и АК4-1.

Механические свойства композиционных структур определяются не только свойствами самих волокон (таблица 2), но и их ориентацией, объёмным содержанием, способностью матрицы передавать волокнам приложенную нагрузку и др.

Таблица 2 – Свойства нитевидных кристаллов и непрерывных волокон

Упрочнитель	Температ. плавл, °С	Плотность кг/м ³	Предел прочности, Гн/м ²	Удельная прочность, Мн · м/кг	Модуль упругости, Гн/м ²	Удельн.модуль упруг. Мн · м/кг
Непрерывные волокна						
Al ₂ O ₃	2050	3960	2,1	0,53	450	113
B	2160	2630	3,5	1,33	420	160
C	3650	1700	2,5	1,47	250-400	147-235
B ₄ C	2450	2360	2,3	0,98	490	208
SiC	2650	3900	2,5	0,64	480	123
W	3400	19400	4,2	0,22	410	21
Mo	2620	10200	2,2	0,21	360	35
Be	1285	1850	1,5	0,81	240	130
Нитевидные кристаллы						
Al ₂ O ₃	2050	3960	28 [#]	7,1	500	126
AlN	2400	3300	15 [#]	4,55	380	115
B ₄ C	2450	2520	14 [#]	5,55	480	190
SiC	2650	3210	27 [#]	8,4	580	180
Si ₃ N ₄	1900	3180	15 [#]	4,72	495	155
C	3650	1700	21 [#]	12,35	700	410

Примечание [#] -- максимальные значения

Важнейшими технологическими методами изготовления композиционных структур (материалов) являются:

- пропитка армированных волокон матричным материалом;
- формование в просфоре лент упрочнителя и матрицы, полученных намоткой;
- холодное прессование обоих компонентов с последующим спеканием;
- электрохимическое нанесение покрытий на волокна с последующим прессованием;
- осождение матрицы плазменным напылением на упрочнитель с последующим обжатием;
- пакетная диффузионная сварка многослойных лент структурных элементов;
- совместная прокатка армирующих элементов с матрицей и др.

В узлах конструкций, требующих наибольшего упрочнения, армирующие волокна располагаются по направлению приложенной нагрузки. Цилиндрические тела и другие изделия вращения (например, сосуды высокого давления) армируют волокнами, ориентируя их в продольном и поперечном направлениях.

Увеличение прочности и надёжности в работе цилиндрических корпусов, а также уменьшение их массы достигается внешним армированием конструкций высокопрочными и высокомодульными волокнами, что позволяет повысить в 1,4–2,0 раза удельную конструктивную прочность по сравнению с цельнометаллическими корпусами.

Упрочнение структур волокнами из тугоплавких веществ значительно повышает их жаропрочность. Например, армирование никелевого сплава вольфрамовым волокном (проволокой) позволяет повысить его жаропрочность при 1100°С в два раза.

Весьма перспективны композиционные структуры, армированные нитевидными кристаллами (усаами) керамических, полимерных и других структур. Размеры усов обычно составляют от долей до нескольких микрометров по диаметру и примерно 10–15 мм по длине.

Делаются композиционные структуры со специальными свойствами, например, радиопрозрачные и радиопоглощающие структуры, прозрачные бетоны, пропускающие свет во внутрь помещений, структуры для тепловой для тепловой защиты космических аппаратов с малым коэффициентом линейного термического расширения и высоким удельным модулем упругости и другие.

Свойства композиционных структур на основе алюминия (прочность, модуль упругости и длительная прочность) более чем в 2 раза (до 500°С) выше, чем у обычных сплавов.

Композиционные структуры с никелевой и кобальтовой матрицами увеличивают уровень рабочих температур от 1000 до 1200°С, а на основе тугоплавких металлов и соединений — до 1500–2000°С.

Повышение прочностных и упругих свойств структур позволяет существенно облегчить конструкции, а увеличение рабочих температур этих структур даёт возможность повысить мощность двигателей внутреннего сгорания, тепловых котлов и других агрегатов.

Области применения композиционных структур многочисленны. Начиная с авиационно-космической, ракетной и другой специальной техники, они могут быть успешно применены в энергетическом турбостроении, в автомобильной промышленности (детали двигателей и кузовов машин), в машиностроении (корпуса и детали станков, кузнечно-прессовое оборудование), в горной промышленности (буровой инструмент, буровые машины), в металлургической промышленности (огнеупорные материалы для футеровки печей, кожуха, наконечники терморпар), в строительстве (пролёты мостов, опоры мостовых ферм, панели для высотных сборных сооружений), в химической промышленности (автоклавы, цистерны, аппараты для кислот, ёмкости для перевозки нефтепродуктов и кислот), в текстильной промышленности (детали прядильных машин, ткацких станков), в сельскохозяйственном машиностроении (лемеха, отвалы плугов, сошники сеялок, корпуса и стойки для тяжёлых условий работы), в бытовой технике (детали стиральных машин и холодильников, рамы спортивных велосипедов, мотоциклов, детали радиоаппаратуры).

Спрос на композиционные структуры ежегодно растёт, что требует создания новых методов изготовления деталей и изменения принципов расчётов и конструирования техники [10, 11, 15, 17].

Строение двойных металлических систем.

В самых первых исследованиях систем Fe - C (железо - углерод) было установлено, что в диаграмме состояния железо - углеродистых сплавов в качестве богатой углеродом составляющей может присутствовать графит или химическое соединение Fe_3C (6,67% C). Это соединение известно как “цементит”, который присутствует в структуре даже медленно охлаждённых сплавов, и разложение его на железо и графит требует длительная выдержка при повышенных температурах. В диаграмме состояния, о которых пойдёт речь ниже, где составляющая представлена углеродом, присутствует в некотором количестве цементит. Такое состояние сплава даёт право называть диаграмму метастабильного равновесия в отличие от равномерной диаграмму железо—графит.

Существование метастабильной системы “железо — цементит” наряду со стабильной системой “железо—графит” обусловлено возникновением двумерных и трёхмерных зародышей цементита, а также линейной скоростью их роста при определённой температуре для всех составов оказывается существенно большей, чем скорость возникновения и роста соответствующих графитных зародышей. Метастабильная система Fe — Fe_3C объясняется трудностью самодиффузии атомов железа. Диаграмма состояния железоуглеродистого сплава представлена на рис 1. По горизонтальной линии (линия абсцисс) отложены атомные проценты (в некоторых источниках даются весовые проценты и методика пересчёта их в атомные проценты), а по оси ординат — температура [8].

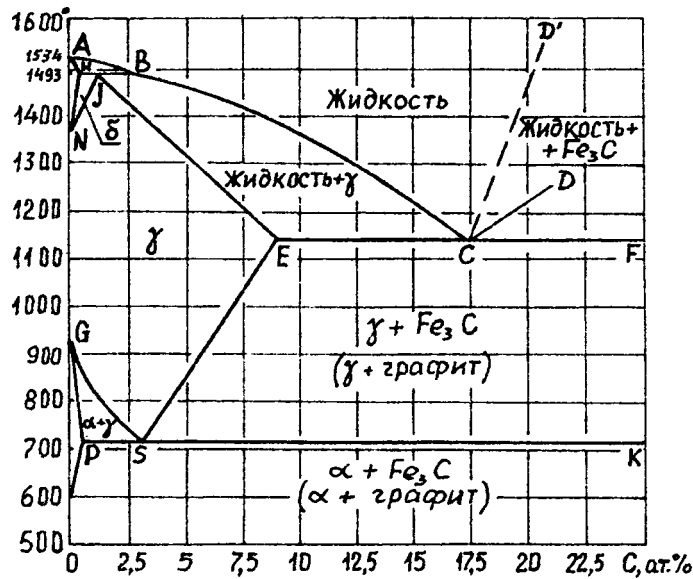


Рис. 1. Диаграмма сплава углерод-железо в ат.%

Здесь мы представляем лишь простейшие изобарические (при давлении 1 атм) диаграммы состояния двойных систем, в которых существуют только жидкие фазы L и твёрдые S.

Жидкость, состав которой отвечает точке E, затвердевает при постоянной температуре в тонкую смесь кристаллов A и C. Из жидкостей, состав которых лежит между A и C, при охлаждении начинают выпадать кристаллы γ (графит), вследствие чего содержание B ($\gamma + Fe_3C$) в жидкости увеличивается; когда её состав будет отвечать точке C, процесс закончится кристаллизацией эвтектики.

Точно так же происходит затверждение жидкостей (железо — углерод), состав которых лежит между C и D, начинается выпадением кристаллов Fe_3C и заканчивается кристаллизацией эвтектики. Прямая ECF линией солидуса (геометрическое место температур конца кристаллизации). Температура эвтектической горизонтали ECF — $1147^{\circ}C$ для расплава $\gamma \leftrightarrow Fe_3C$ и 17,28 ат.%C.

При современном уровне развития металловедения диаграммы состояния должны представляться в атомных процентах. Приведенная диаграмма состояния является бинарной или

двухкомпонентной системой (рис. 2). В практике системы могут быть трёх-, четырёхкомпонентными.

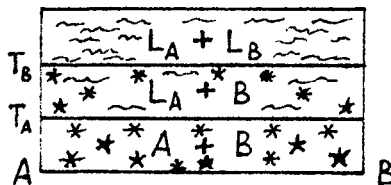


Рис. 2. Диаграмма состояния температур плавления компонентов А и В

Двойные системы – это физико-механические системы, состоящие из двух независимых частей (компонентов). Особое практическое значение имеют конденсированные двойные системы, то есть не содержащие газов или паров.

О двойниковых системах, состоящих только из жидких фаз или жидкости и газа (пара), рассказывается в разделе “жидкие смеси”; о двойниковых системах из твёрдых фаз и газа (пара) — в “термодинамической системе”.

Если взаимная растворимость компонентов А и В в жидком и твёрдом состоянии отсутствуют, то диаграмма состояния изображается двумя горизонтальными прямыми, проведенными через точки T_A и T_B , отвечающие температурам плавления компонентов А и В. Выше точки T_B система состоит из двух жидких фаз L_A и L_B ; между T_B и T_A — из жидкой L_A и кристаллов В; ниже T_A — из смеси кристаллов А и В. Если взаимная растворимость А и В (в нашем случае А соответствует железу Fe, а В - углероду С, рис. 1) в жидком состоянии не ограничена, а в твёрдом ограничена, то в случае образования эвтектики последняя состоит из смеси двух твёрдых растворов α и Fe_3C , предельные концентрации которых отвечают точкам Е и С при эвтектической температуре и точке S при комнатной [9, 10, 11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников Н.Ф. “Структура и симметрия”. Ежегодник. - 1969. - 208 с. 2. Блауберг И.В. и др. Становление и сущность системного подхода. - М. - 1973. - 170 с. 3. Аносов В.Я. Основные начала физико-химического анализа. - М. - 1976. - 503 с. 4. Курнаков Н.С. Избранные труды. Металловедение. Т.2. - М. - 1961. - 611 с. 5. Гиббс Дж. Термодинамические работы. - М.-Л. - 1950. - 492 с. 6. Дервинг В.П. и др. Правило фаз с изложением основ термодинамики. - М. - 1964. - 455 с. 7. Туманов А.Т. “Металловедение и термическая обработка металлов”, №4. - 1972. - с.24. 8. Современные композиционные материалы. Пер. с англ. - М. - 1970. - 672 с. 9. Юм-Розери В., Рейнор Г.В. Структура металлов и сплавов. Пер. с англ. - М. - 1959. - 391 с. 10. Вол А.Е. Строение и свойства двойных металлических систем. Т.1-2. - М. - 1962. - 982с. 11. Шоршов М.Х. и др. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей. - М. - 1981. - 268 с.

УДК 621.1; 621,7.

Зубко С.А.

РОСТ ТРЕЩИНЫ В ВЕРШИНЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА НА РАЗРЫВ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Как было показано в работе [1], в процессе испытаний стального образца на разрыв, в вершине растущей трещины в стальном образце был установлен и показан методом голографии-

ческой интерферометрии скачкообразный характер роста трещины. По мере нарастания нагрузки в вершине накапливались упруго-пластические деформации материала, которые локализовались в виде растущего «языка» пропорционального растущим напряжениям в вершине трещины. Достигнув определенной величины, происходил прострел (разрыв) всей зоны локализации деформаций с образованием прироста трещины по всей локализованной зоне. Деформации в вершине трещины исчезали и, при дальнейшем возрастании нагрузки, появлялись снова в виде растущего «языка» и исчезали с появлением нового приращения длины трещины на величину появляющегося «языка». Процесс периодически повторялся на фоне монотонно возрастающей нагрузки на нагружаемый образец.

Таким образом, в процессе приложения нагрузки в направлении увеличения раскрытия трещины, в вершине трещины происходит этап концентрации и локализации деформаций в виде растущего «языка» впереди вершины трещины, и затем происходит разрыв локализованной зоны с увеличением длины трещины на длину локализованной зоны. Напряженность системы уменьшается, напряжения в материале понижаются до уровня меньшего напряжения разрыва материала и процесс разрушения материала прекращается. При дальнейшем возрастании нагрузки растяжения картина повторяется и заканчивается следующим этапом увеличения длины трещины.

На интерферограмме (рис.1) представлено изображение вершины трещины под действием растягивающей нагрузки и формирования «языка» деформаций впереди вершины трещины.

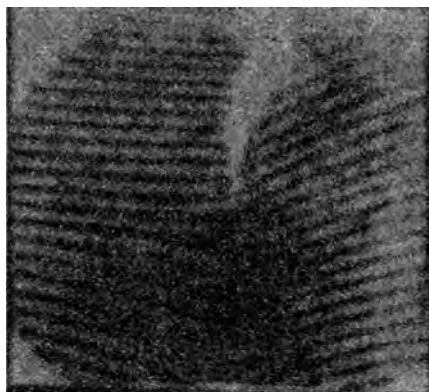


Рис.1

Эксперимент был проведен на упруго пластическом стальном образце размером 45 x 45 мм из ст.45, толщиной 10 мм.

На середине одной из его сторон был выполнен V-образный надрез с углом раскрытия 45 градусов.

В вершине V-образного надреза, методом вибрационного нагружения, была выращена зародышевая трещина.

Образец, подготовленный таким образом, закреплялся в нагружающем устройстве, позволяющим прикладывать к образцу растягивающие нагрузки.

На нагружающем устройстве был смонтирован голографический интерферометр для измерения и регистрации поверхностных деформаций в зоне вершины трещины образца под действием растягивающих напряжений.

По мере увеличения растягивающей нагрузки велся постоянный контроль (под микроскопом) деформационного поля образца в зоне вершины трещины.

С ростом растягивающих напряжений в вершине трещины наблюдалось постепенное увеличение поля деформаций в виде острого языка, выступающего и растущего перед вершиной трещины до определенной величины. Затем происходил резкий, скачкообразный рост (выброс) от вершины трещины на величину языка поля деформаций.

После такого прострела локальное поле деформаций исчезало, т.е. произошло частичное уменьшение растягивающей нагрузки, по нашему представлению, за счет упругой составляющей нагрузки в вершине трещины на величину σ_y .

При этом условии роста трещины при приложенном растягивающем напряжении σ_p будет [2,3]:

$$\sigma_p \geq \sigma + \sigma_y = (8E\alpha / 3bL),$$

где σ_y – упругая часть напряжений,

α – поверхностное натяжение,

E – модуль Юнга,

L – длина упруго пластической зоны деформации в вершине трещины.

При σ_p больше $(\sigma + \sigma_y)$ трещина будет расти, после исчезновения упругой составляющей напряжения σ_y условия изменяются на $(\sigma_p < \sigma)$ и рост трещины прекращается.

Таким образом, распространение трещины в стальном образце можно представить, как ступенчато нарастающий, пульсирующий, не стационарный процесс, с частотой повторения, определяемый упругими и другими прочностными характеристиками материала [4]. Влияние этих параметров и условий испытания определяет жесткость испытаний и истинность их результатов.

После очередного дополнительного увеличения напряжений начинало появляться и постепенно расти снова новое, в виде языка, поле деформаций в зоне вершины трещины. Ступенчатый процесс роста трещины повторяется каждый раз после достижения напряжением критической величины, достаточным для разрыва материала в зоне языка деформаций. Процесс циклически повторяется.

Величина (длина) языка поля деформаций, по видимому, определяется прочностными свойствами испытуемого материала и может быть характеристическим коэффициентом для расчетов прочностных параметров.

Кроме того можно получить также более полное представление о характере разрушения материала в области вершины развивающейся трещины и понять механизм и кинетику развития трещины и разрушения материала.

И так, очевидно можно сделать вывод, что разрушение материала происходит кусочно импульсным способом, изменяя напряженное состояние от высокого прорывного уровня накопления энергии вследствие накопления энергии растягивающей нагрузки с последующей расстройкой ее в чередующихся циклах коротких ступенчатых прострелов, увеличивающих длину трещины, приводящих к уменьшению напряженного состояния, к более низкому уровню, ниже которого разрыв материала прекращается и условия приходят к первоначальному, исходному состоянию. Цикл после этого повторяется.

Как отмечалось в более ранних работах [5], при растяжении на кривых напряжение-деформация в некоторых случаях наблюдается зубчатый участок [5] (с.203, фиг. 40). Напряжение, необходимое для дальнейшего повышения деформации скачкообразно падает, повышается и вновь падает. Кривая напоминает пилу.

Авторы связывают эти участки с явлением механического и деформационного двойникования, дислокационными явлениями и роста плотности дислокаций.

После рассмотрения материалов статьи мы вправе сделать вывод, что процесс роста трещины и образования новых путем двойникования рост трещины

ЛИТЕРАТУРА:

1. Зубко С.А. Характер развития трещины при испытании стального образца на усталость. Респ. межв.сб.научн.трудов. Вып.23, 2007. Минск, БНТУ, стр.314-316.
2. Cottrell A., li., Dislocations and Plastic Flow in Crystals, Clarendon Press, Oxford, 1953; русский перевод: К о т т р е л л А. Х., Дислокации и пластическое течение в кристаллах, Металлургиздат, 3.Физический энциклопедический словарь. т.4: М., Советская энциклопедия,1965.,стр.236-238.
4. Материаловедение. Учебник.- В.А.Струк и др., Минск: ИВЦ Минфина, 2008,-519 с., с.115-117.
- 5.Физическое металловедение. Вып.3. Под редакцией Р.Кана. Пер. с англ.Изд-во «Мир», М. 1968.

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕХЛА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ АТОМНОГО РЕАКТОРА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности элементов конструкции является необходимой частью моделирования эксплуатационных, переходных и аварийных режимов на атомных электростанциях (АЭС). Адекватное моделирование требует многомерного термомеханического расчёта в геометрически нелинейной постановке в области с переменными границами при больших деформациях, связанных с пластичностью и высокотемпературной ползучестью стали, с возможным контактным взаимодействием. Хотя решение подобных задач ведётся уже давно, далеко не все применяемые программные средства обладают необходимым набором моделей и расчетных модулей. В этот набор, помимо возможности решать задачи термоупругости, должны входить модели геометрической нелинейности (радиационное распухание), а также высокотемпературной и радиационной ползучести.

Работа любого ядерного реактора АЭС связана с постоянным мониторингом безопасности, которая основана на безопасной работе его отдельных элементов. Одним из таких элементов является чехол тепловыделяющей сборки (ТВС), имеющий форму призматической оболочки

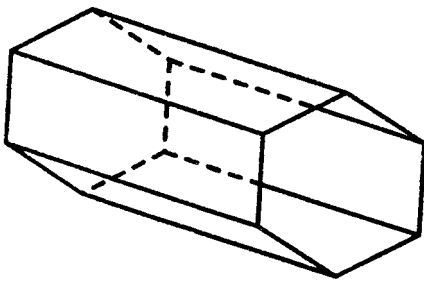


Рис. 1. Модель чехла ТВС, имеющего форму призматической оболочки

находящийся в сложных условиях: постоянное механическое воздействие, влияние неравномерных полей высоких температур и радиационного облучения. Отметим, что под работоспособностью шестигранного чехла ТВС понимается [1]: сохранение целостности чехла как на стадии облучения сборки в активной зоне, так и при перегрузке; отсутствие значительных формоизменений чехла, могущих помешать нормальной эксплуатации активной зоны ядерного реактора АЭС. На первой стадии расчетного определения работоспособности проводится расчет напряжений и деформаций, а также формоизменений чехла в процессе нейтронного облучения, после чего следует оценка опасности

напряженно-деформированного состояния по тому или иному критерию прочности. В результате чего устанавливается предельно допустимый ресурс ТВС ядерного реактора АЭС.

Каждую грань чехла ТВС будем рассматривать как прямоугольную пластинку, находящуюся под гидростатическим давлением, концы которой (по граням) закреплены таким образом, что не могут перемещаться в вертикальном направлении и поворачиваться, но их продольное перемещение не исключено. В этом случае каждое сечение можно рассматривать как независимое, и согласно работе [2], если длина пластины H существенно больше ее ширины l ($H/l > 3$), правомерно перейти к полосе единичной ширины. Прогиб такой полоски описывается дифференциальным уравнением аналогичным уравнению прогиба изогнутой балки. При вычислении напряжений предполагаем, что поперечные сечения стержня остаются при изгибе плоскими. В связи с малостью касательных напряжений расчет при поперечном изгибе можно производить только по нормальным напряжениям.

С учетом вышеизложенного и в целях упрощения вычислений, заменим рассмотрение всей призматической оболочки на ее одну грань, имеющей форму тонкостенной пластины, добавив соответствующие усилия и моменты от действия соседних граней (рис. 2-3), так как на чехол ТВС, имеющий форму призматической оболочки, действует одинаковая нагрузка во всех направлениях ее граней.

В случаях, когда прогиб ω пластины мал по сравнению с ее толщиной h , имеется возможность построения приближенной теории изгиба пластины под поперечной нагрузкой, основываясь на следующих допущениях [3]:

- в срединной плоскости пластина не испытывает никаких деформаций, при изгибе остается нейтральной;
- точки пластины, лежащие до загрузки на нормали к срединной поверхности, остаются в процессе изгиба на нормали к ее срединной поверхности;
- нормальными напряжениями в направлении поперечном к срединной плоскости пластины допустимо пренебрегать.

Рассмотрим действие физической нагрузки, распределенной по верхней поверхности пластины (рис. 2), без учета поля высоких температур и радиационного воздействия.

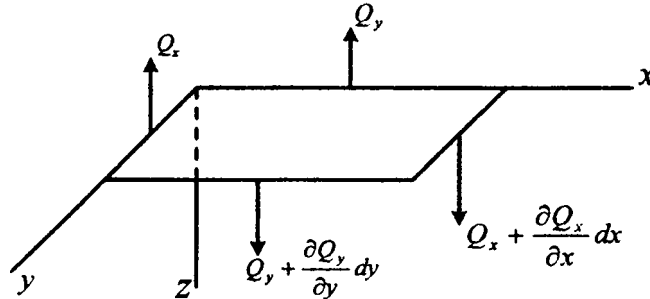


Рис. 2. Проекция всех действующих на пластину сил по оси z

Спроектируем все приложенные к пластине силы на ось z

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} dx dy + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dx dy + q dx dy = 0. \quad (1)$$

Откуда получаем исходное уравнение равновесия, записанное через приложенные нагрузки

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q = 0. \quad (2)$$

Для записи уравнения равновесия через моменты, возьмем моменты от всех действующих на элемент сил относительно оси x, как представлено на рис. 3.

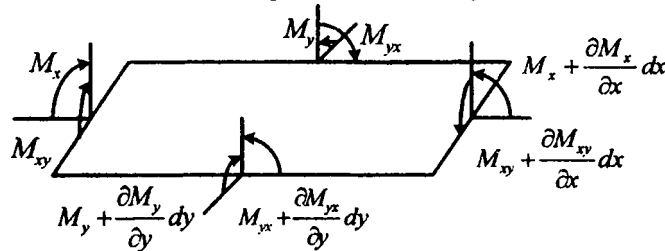


Рис. 3. Распределение моментов от всех действующих на пластину сил относительно оси x и y

Исходя из рис. 3, уравнение равновесия можно представить

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} dx dy - \frac{\partial M_y}{\partial y} dx dy + Q_y dx dy = 0. \quad (3)$$

Моментом нагрузки q и моментом, возникающим вследствие изменения силы Q_y , пренебрегаем как величинами более высокого порядка малости. Тогда уравнение (3) примет вид:

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial y} + Q_y = 0. \quad (4)$$

Аналогичным образом возьмем моменты относительно оси y , записав следующее уравнение равновесия:

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial M_x}{\partial x} - Q_x = 0. \quad (5)$$

Исключив из этих уравнений перерезывающие силы Q_x и Q_y , получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{yx}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} = -q. \quad (6)$$

Вследствие закона парности касательных напряжений $M_{yx} = -M_{xy}$, тогда

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} = -q. \quad (7)$$

Запишем соотношения Коши (геометрические уравнения), связывающие деформации с величиной прогиба исследуемой пластины в виде:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= -z \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}, \\ \varepsilon_y &= -z \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для дальнейшего решения поставленной задачи, выведем физические уравнения. Учитывая, что нормальные напряжения на площадках, параллельных срединной поверхности оболочки пренебрежимо малы по сравнению с остальными напряжениями и при расчёте не учитываются, запишем систему физических уравнений в следующем виде:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_{11} - \nu \cdot \sigma_{22}] + \varepsilon_x^h, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_{22} - \nu \cdot \sigma_{11}] + \varepsilon_y^h. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Где неупругие деформации (объемные термические деформации и деформации радиационного распухания), вызванные воздействием нелинейных факторов, определяются выражениями (10):

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_x^H &= \varepsilon_x^T + \varepsilon_x^S; & \varepsilon_y^H &= \varepsilon_y^T + \varepsilon_y^S; \\ \varepsilon_x^T &= \varepsilon_y^T = \alpha T(X, Y, Z); \\ \varepsilon_x^S &= \varepsilon_y^S = \frac{1}{3} S(T, \phi t). \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Здесь α – коэффициент линейного расширения материала оболочки, T – предполагается заданной функцией распределения температуры от координат; S – функция радиационного распухания материала (задается на основе экспериментальных данных), зависящая от температуры, времени и плотности заданного нейтронного потока (флюенса) [4]:

$$S = 4.9 \cdot 10^{-51} (\phi \cdot t)^{1.71} \cdot 10^{\frac{15490}{T} + \frac{5.98 \cdot 10^6}{(r)^2}}, \quad (11)$$

где ϕ – плотность нейтронного потока, t – время.

Предполагается, что существующие градиенты температуры и распухание материала (в данном случае нержавеющая холоднодеформированная сталь ОХ16Н15М3Б) по длине и толщине чехла вносят существенный вклад в НДС оболочки. Отметим, что нижние сечения ТВС характеризуется относительно высоким давлением теплоносителя, низким уровнем температур и нейтронных флюенсов, а по направлению движения теплоносителя снизу вверх давление его падает, однако при этом растет температура и увеличивается флюенс нейтронов.

Запишем систему физических уравнений через внутренние силы и моменты, а затем выразим из системы уравнений (9) σ_x и σ_y :

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_x - \varepsilon_x^H + \nu \cdot (\varepsilon_y - \varepsilon_y^H)] \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_y - \varepsilon_y^H + \nu \cdot (\varepsilon_x - \varepsilon_x^H)] \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Выражения (12) устанавливают связь между деформациями в произвольной точке оболочки и напряжениями соответствующей точки срединной поверхности. Для записи соотношения, связывающего напряжения с прогибами, появляющимися в пластине во время ее эксплуатации, подставим в уравнение (12) соответствующие соотношения Коши (8).

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left[-z \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \varepsilon_x^H + \nu \left(-z \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} - \varepsilon_y^H \right) \right], \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left[-z \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} - \varepsilon_y^H + \nu \left(-z \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \varepsilon_x^H \right) \right]. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Воспользуемся формулами для определения изгибающего момента [5]:

$$\left\{ \begin{aligned} M_x &= -D\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right), \\ M_y &= -D\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}\right), \\ M_{xy} &= -M_{yx} = D(1-\nu) \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Применим формулы (14) к уравнению равновесия (7) получим уравнение равновесия, выраженное через прогибы:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{D}. \quad (15)$$

Если учесть моменты от нелинейных сил, то в окончательной форме получим уравнение равновесия, описывающее поведение пластины, находящейся под действием физической нагрузки, поля высоких температур и радиационного воздействия (16):

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{D} - Eh \left(\alpha T + \frac{1}{3} S \right) \quad (16)$$

Уравнение (16) позволит определить прогибы, возникающие в пластине, находящейся под действием вышеуказанных нагрузок, после чего будет возможно определить основные прочностные характеристики: деформации (8) и напряжения (12), возникающие в пластине, а, следовательно, и в призматической оболочке.

При решении принимаются следующие допущения: сечения при деформировании остаются плоскими; свойства материала при растяжении и сжатии одинаковы; основные гипотезы теории течения сохраняются и под облучением во внутриреакторных условиях.

Как видно, для учета влияния нелинейных эффектов (неравномерное распухание стали, температурные градиенты по высоте) требуется новая постановка задачи. Получить решение такой задачи в аналитическом виде не представляется возможным из-за влияния многих факторов, поэтому необходимо использование численных методов. Тогда следующим этапом исследований станет определение прогибов, деформаций и напряжений, возникающих в призматической оболочке, с помощью одного из приближенных численных методов. После чего можно будет описать полную картину НДС чехла тепловыделяющей сборки атомного реактора, что позволит определить сроки эксплуатации и предельные нагрузки, возникающие в ТВС во время работы реактора.

Для получения значений прогибов и напряжений необходимо дифференциальное уравнение (16) представить в разностном виде:

$$\begin{aligned} \omega_{ij} &= \left(- \frac{\omega_{i+2j} - 4\omega_{i+1j} - 4\omega_{i-1j} + \omega_{i-2j}}{h_i^4} + \right. \\ &+ 2 \frac{-2\omega_{ij-1} + \omega_{ij-2} - 2(\omega_{i-1j} - 2\omega_{i-1j-1} + \omega_{i-1j-2}) + \omega_{i-2j} - 2\omega_{i-2j-1} + \omega_{i-2j-2}}{h_i^4} + \\ &\left. + \frac{\omega_{ij+2} - 4\omega_{ij+1} + 6\omega_{ij} - 4\omega_{ij-1} + \omega_{ij-2}}{h_j^4} + q / D - h \left(\alpha T + \frac{1}{3} S \right) \cdot \frac{1}{\frac{6}{h_i^4} + \frac{6}{h_j^4} + \frac{2}{h_i^2 h_j^2}} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Для численного решения дифференциального уравнения 4-го порядка необходимо задать восемь граничных условия. Будем считать, что пластина закреплена жестко по всему периметру, тогда граничные условия запишутся в следующем разностном виде:

$$\begin{aligned} \omega_{0j} &= 0, \frac{\omega_{i1} - \omega_{i0}}{h_j} = 0 \text{ при } x = 0; \\ \omega_{0j} &= 0, \frac{\omega_{i1} - \omega_{i0}}{h_j} = 0 \text{ при } x = a; \\ \omega_{i0} &= 0, \frac{\omega_{i,j} - \omega_{0j}}{h_j} = 0 \text{ при } y = 0; \\ \omega_{i0} &= 0, \frac{\omega_{i,j} - \omega_{0j}}{h_j} = 0 \text{ при } y = b, \end{aligned} \tag{18}$$

где a, b – геометрические размеры пластинки.

Для определения прогибов и возникающих напряжений в пластине была составлена программа в прикладном комплексе для решения технических задач MatLab. В результате расчетов, проведенных по написанной программе, были получены следующие эпюры распределения прогибов пластины и напряжений, возникающих под действием распределенной нагрузки (рис. 4-6).

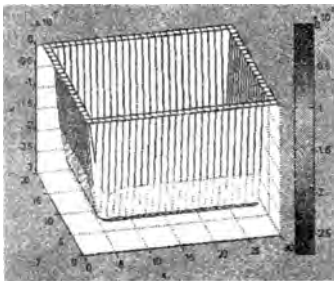


Рис. 4. Эпюра прогибов пластины под действием равномерно распределенной нагрузки

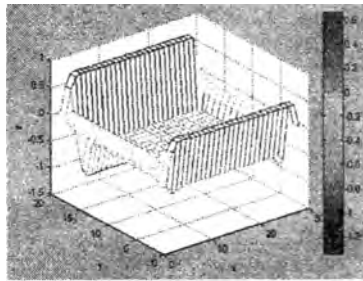


Рис. 5. Эпюра напряжений σ_{11} под действием равномерно распределенной нагрузки

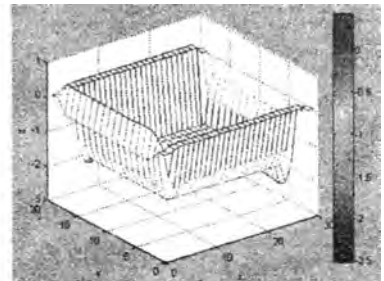


Рис. 6. Эпюра напряжений σ_{22} под действием равномерно распределенной нагрузки

Далее был проведен сравнительный анализ полученных результатов (в математическом пакете MatLab) с решением для механической упругой задачи в программной среде МКЭ ANSYS (рис. 7).

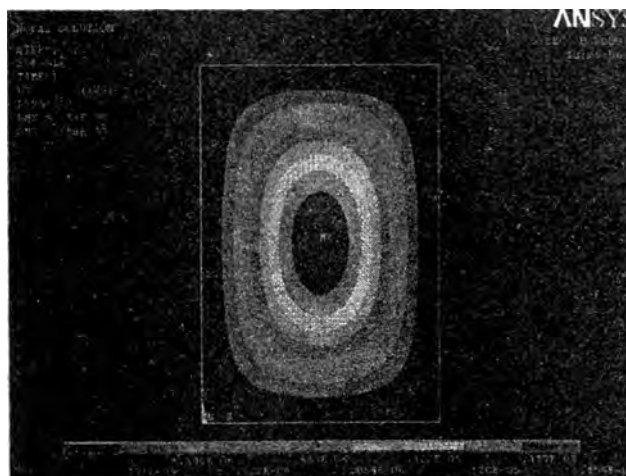


Рис. 7. Эпюра прогибов пластины по действию равномерно распределенной нагрузки

Значения прогибов по площади оболочки, полученные в пакете MatLab (рис. 4) совпадают со значениями прогибов, полученных в пакете ANSYS (рис. 7), что, в свою очередь, говорит о правильности составленного дифференциального уравнения и выборе численного метода решения рассматриваемой задачи исследования НДС призматической оболочки.

Учитывая тот факт, что обычный ресурс элементов активной зоны ядерных установок составляет порядка 7000 часов, необходимо проводить оценку напряженно-деформированного состояния на различных временных этапах. Исходя из этого, были получены эпюры напряжений и прогибов после 100, 300 и 6000 часов эксплуатации призматической оболочки (рис. 8-16).

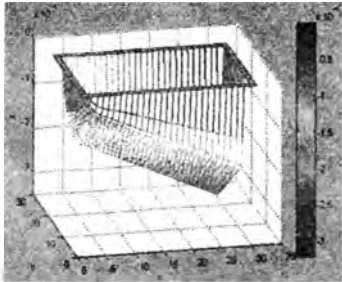


Рис. 8. Эпюра прогибов пластины под действием равномерно распределенной нагрузки, температуры и распухания при $t=100$ ч.

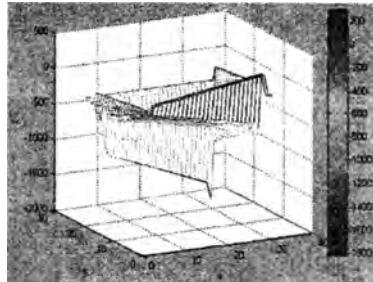


Рис. 9. Эпюра напряжений σ_{11} под действием равномерно распределенной нагрузки, температуры и распухания при $t=100$ ч.

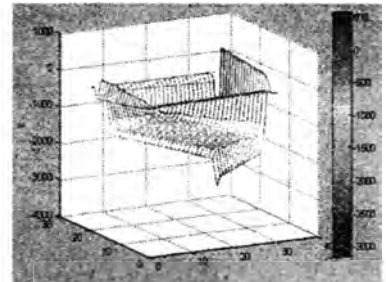


Рис. 10. Эпюра напряжений σ_{22} под действием равномерно распределенной нагрузки, температуры и распухания при $t=100$ ч.

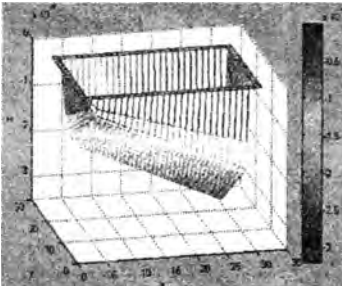


Рис. 11. Эпюра прогибов пластины под действием равномерно распределенной нагрузки, температуры и распухания при $t=300$ ч.

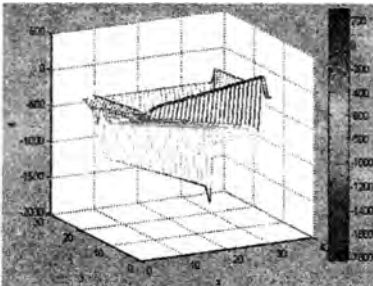


Рис. 12. Эпюра напряжений σ_{11} под действием равномерно распределенной нагрузки, температуры и распухания при $t=300$ ч.

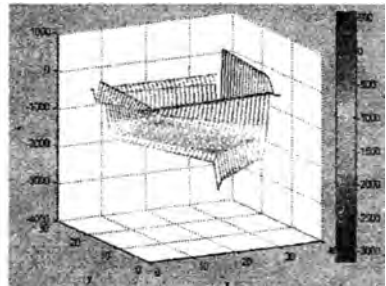


Рис. 13. Эпюра напряжений σ_{22} под действием равномерно распределенной нагрузки, температуры и распухания при $t=300$ ч.

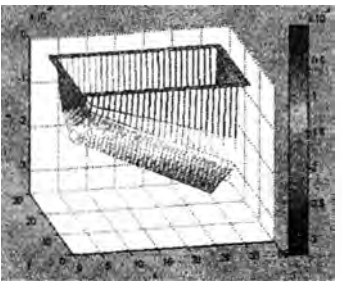


Рис. 14. Эпюра прогибов пластины под действием равномерно распределенной нагрузки, температуры и распухания при $t=6000$ ч.

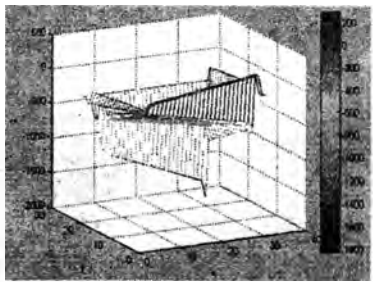


Рис. 15. Эпюра напряжений σ_{11} под действием равномерно распределенной нагрузки, температуры и распухания при $t=6000$ ч.

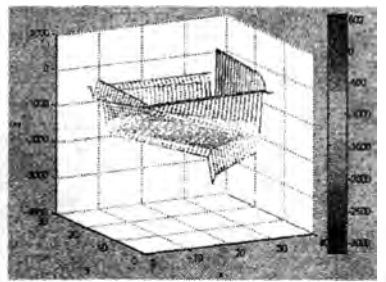


Рис. 16. Эпюра напряжений σ_{22} под действием равномерно распределенной нагрузки, температуры и распухания при $t=6000$ ч.

Полученные эпюры прогибов и напряжений, возникающих, в процессе эксплуатации призматической оболочки, позволяют оценить надежность проектируемой конструкции ТВС атомного реактора на различных временных этапах его эксплуатации.

В результате исследований можно заключить о полноте выполнения изначально поставленной задачи – были получены разрешающие дифференциальные уравнения, разработана математическая модель и алгоритм нахождения основных характеристик НДС, запрограммирован метод нахождения решения квазистатической задачи в программном комплексе MatLab и по-

строены эпюры распределения прогибов и напряжений с учетом механических и терморadiaционных нагрузок. Также был проведен сравнительный анализ результатов для механической упругой задачи (отсутствие терморadiaционных нагрузок) полученных численным методом и в среде инженерно-программного комплекса FEA ANSYS, в результате чего можно заключить о правильности выбранного численного метода, как для упругой механической задачи, так и для полного спектра всех внутриреакторных нагрузок. Техничко-экономическая эффективность результатов настоящих разработок заключается в возможности проводить численные расчеты напряженно-деформированного состояния призматической оболочки, находящейся в условиях ядерных реакторов, без реализации дорогостоящих экспериментов. Область применения – расчёты механики деформируемого твёрдого тела для конструкций и материалов, как атомного машиностроения, так и ядерной энергетики в целом.

Благодарности

- Авторы благодарят д.ф.-м.н. И.С.Куликова и д.т.н. Б.Е.Тверковкина за плодотворные обсуждения и дискуссии в ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси.
- Работа выполнена при поддержке гранта БФФИ № Т09М-090 (№ госрегистрации: 20091888).

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов В.П., Драгунов Ю.Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИздАТ, 2002. – 480 с. 2. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248с. 3. Займовский А.С. Тепловыделяющие элементы атомного реактора/ А.С. Займовский, В.В. Калашников, И.С. Головин. – М.: Атомиздат, 1979. – 517с. 4. Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов/ И.С.Куликов, Б.Е. Тверковкин. – Мн.: Наука и техника, 1984. – 104с. 5. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. 1979. – 744с.

УДК 621.81:539.4

Куриленко В.В., Пронкевич С.А., Александров А.А.

АНАЛИЗ НДС ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Широкие кинематические возможности планетарной передачи являются одним из основных ее достоинств и позволяют использовать передачу в различных областях машиностроения. Мощность передается по нескольким потокам, число которых равно числу сателлитов, что уменьшает нагрузку в каждом зацеплении. Внутреннее зацепление обладает повышенной нагрузочной способностью, так как у него больше приведенный радиус кривизны в зацеплении, поэтому наиболее опасным является внешнее зацепление.

Основными элементами, определяющими работоспособность зубчатых передач, являются зубья. Решающее влияние работоспособность зуба оказывают контактные напряжения σ_H и напряжения изгиба σ_F . Для каждого зуба σ_H и σ_F не являются постоянно действующими. Они изменяются во времени согласно некоторому прерывистому отнулевому циклу. Время действия напряжения σ_F за один оборот колеса равно продолжительности зацепления одного зуба. Напряжения σ_H действуют еще меньшее время. Переменные напряжения являются причиной усталостного разрушения зубьев: поломка зубьев от напряжений изгиба и выкрашивание поверхности от контактных напряжений. С контактным напряжением и трением в зацеплении связаны также износ, заедание и другие виды повреждения поверхностей зубьев [1].

В качестве примера рассмотрим планетарную передачу, аналогичную тем, которые используются в редукторах карьерных самосвалов. Ее характеристики: модуль $m=10$, количество

зубьев солнечного колеса $z_a=22$, сателлита $z_g=29$, корончатого колеса $z_b=83$, ширина зубчатого венца $b=150$ мм. Начальные диаметры $d_{w1}=230.33$ мм, $d_{w2}=303.61$ мм, $d_{w3}=820.69$ мм, крутящий момент на солнечном колесе $T=20117$ Нм.

Для получения трехмерной модели зубчатых колес использовался пакет SolidWorks, предназначенный для твердотельного трехмерного моделирования. Профиль зуба был построен путем задания координат согласно уравнениям эвольвенты. Расчет напряженно-деформированного состояния произведен средствами пакета ANSYS Workbench.

Ansys Workbench – программный продукт, в основу которого положен современный объектно-ориентированный подход к инженерному анализу, использует при этом возможности решателей ANSYS. ANSYS – многоцелевой конечно-элементный пакет для проведения анализа в широкой области инженерных дисциплин. Это универсальный конечно-элементный пакет, предназначенный для решения в единой среде на одной и той же конечно-элементной модели задач по прочности, теплу, электромагнетизму, гидрогазодинамике, многодисциплинарного связанного анализа и оптимизации на основе всех выше приведенных типов анализа.

Конечно-элементная сетка строилась таким образом, чтобы обеспечить по возможности большую дискретизацию в зонах контакта и в зонах у основания зуба. Это вызвано тем, что форма и размер конечных элементов значительно влияют на точность решения. Сетка создана трансляцией гексагональных элементов, что позволяет получить регулярную сетку и добиться таким образом лучшей сходимости расчетных результатов. Всего КЭ-сетка содержит порядка 280 000 узлов и 53 000 элементов (рис. 1).

Воздействие одной детали на другую осуществляется через специальные контактные элементы. Контактные элементы образуют особый поверхностный слой в области контакта и позволяют задавать взаимодействие деталей. Расчетные алгоритмы ANSYS позволяют моделировать контакт, не задавая точное совпадение узлов сетки на границе. Такой подход к моделированию контакта разрешает задавать различную плотность сетки в контактирующих деталях, например измельчать сетку в наиболее интересных зонах.

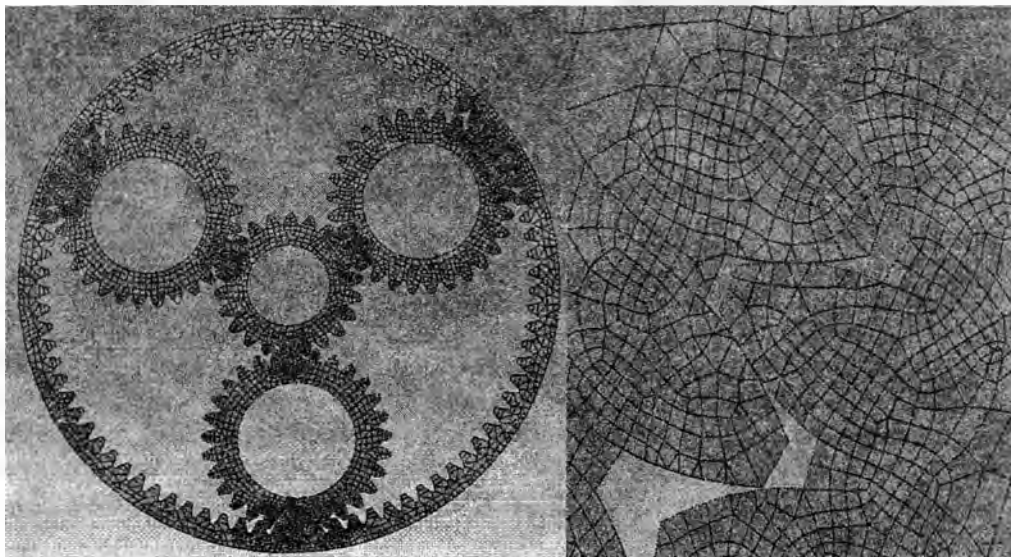


Рис. 1. Конечно-элементная сетка

Для задания свойств материала используется линейная изотропная модель. Для стали: модуль упругости $E=2.1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu=0.23$, плотность $\rho=7000$ кг/м³. Для узлов, находящихся на цилиндрической поверхности корончатого колеса заданы граничные условия полной заделки. Граничные условия для сателлитов состоят в ограничении только в осевом направлении цилиндрической системы координат, что позволяет сателлитам поворачиваться под действием нагрузок. К цилиндрической поверхности солнечного колеса приложен крутящий момент (рис. 2).

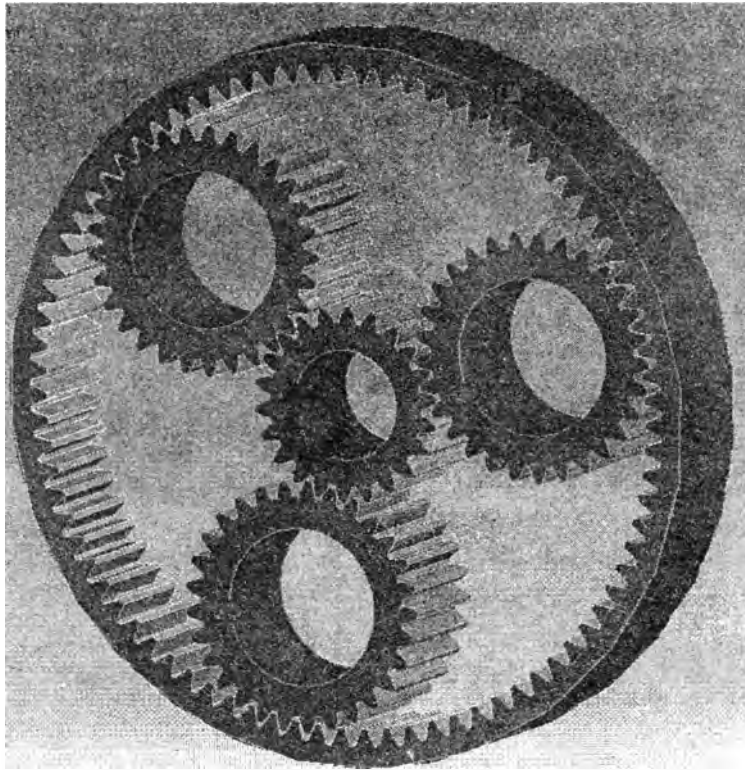


Рис. 2. Схема нагружения

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния для планетарного редуктора приведены на рис. 3. Как и предполагалось, максимальные напряжения $\sigma=180$ МПа действуют в областях внешнего зацепления. Вблизи же внутреннего зацепления напряжения достигают $\sigma=80$ МПа .

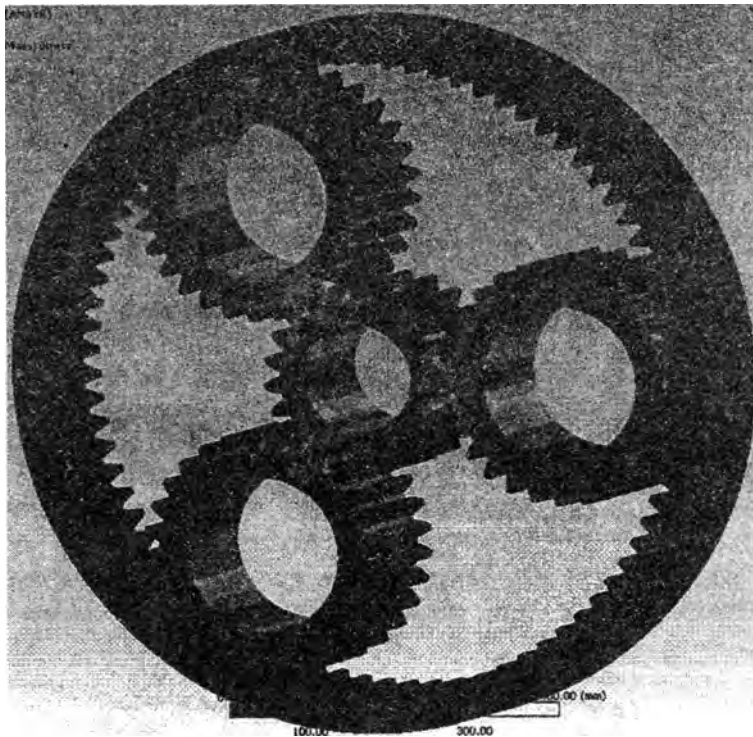


Рис.3. НДС в редукторе

Использование CAD/CAE систем позволяет значительно ускорить и удешевить процесс создания деталей машин, и предсказать их поведение и возможные поломки на этапе проектирования, а также решить эти проблемы еще до создания экспериментального образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Н.Иванов. Детали машин: Учеб. Для студентов вузов/Под ред. В.А.Финогенова – М.:Высш. Шк., 1998. – 383 с.: ил. 2. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. –М: Машиностроение, 2004. -506 с.

УДК 538.911

Неумержицкая Е.Ю.

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ С ПЕРЕХОДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Получение материалов нетрадиционными методами с заданными механическими, физическими и химическими свойствами, рассматривается как существенный резерв создания новых перспективных материалов для современной техники. В последнее время активно и успешно развиваются методы получения материалов сверхбыстрой закалкой из расплава, которые являются энерго- и ресурсосберегающими. При скоростях охлаждения, превышающих 10^5 К/с, удается создать структуру и придать такие свойства материалу, которые нельзя получить традиционными методами синтеза и термической обработкой. Сверхбыстрая закалка из расплава позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики ранее известных и используемых материалов, перевести в аморфное или микрокристаллическое состояние, вызвать измельчение структурных составляющих, значительно увеличить взаимную растворимость компонентов при образовании твердых растворов, привести к формированию метастабильных фаз.

Сплавы алюминия с переходными металлами (Ni, Cr) были получены сплавлением компонент в индукционной печи. Для получения фольги капля расплава (0,2 г) инжектировалась на внутреннюю поверхность вращающегося медного цилиндра, где и происходила кристаллизация. Для исследования брались фольги толщиной 20...80 мкм. Скорость охлаждения жидкости при получении фольг такой толщины $\sim 10^6$ К/с. Сторона фольги прилегающая к кристаллизатору А имела гладкую поверхность, на которой наблюдались гладкие участки и области в виде раковин [1], противоположная сторона Б, контактирующая с окружающей средой, имела бугристую поверхность, на которой формировались выступы и впадины. Морфологию поверхности изучали при больших увеличениях на растровом микроскопе. Для анализа распределения легированных элементов поверхности фольги осуществлялось сканирование по заданной линии с помощью энергодисперсионного SiLi- полупроводникового детектора на растровом микроскопе.

При сверхбыстрой закалке из расплава на поверхности фольг Al чистотой 99,9999% ячеистая и дендритная структуры не наблюдаются (рис. 1а, б). В фольгах сплавов алюминия с переходными металлами (ПМ) при СБЗР формируется ячеистая структура (рис. 1 в, г, д, е). На стороне фольги А ячеистая структура наблюдалась только в раковинах. Это можно объяснить тем, что гладкие участки фольги, прилегая к кристаллизатору, имели скорость охлаждения больше, чем области фольги, на которых образовались раковины. Ячейки в раковинах имели форму многоугольников; их размер составлял 0,5 – 3,0 мкм (рис. 1 в, д). На дне раковины наблюдались ячейки правильной конфигурации, вытянутую форму имели те ячейки, которые «поднимались» со дна раковин на гладкую поверхность, их длина достигала 6,0 мкм, ширина 2,0 мкм. Число сторон ячеек варьировалось от 4 до 8, также наблюдались ячейки округлой формы. На бугристой стороне фольги Б ячеистая структура наблюдалась на всей поверхности, так как скорость охлаждения всей стороны Б также была меньше, чем на гладких участках сто-

роны А. На вершинах бугров ячейки имели форму правильных многоугольников, число сторон которых менялось от 4 до 8 (рис. 1 г, е). Их размер составлял 0,5 – 2,5 мкм.

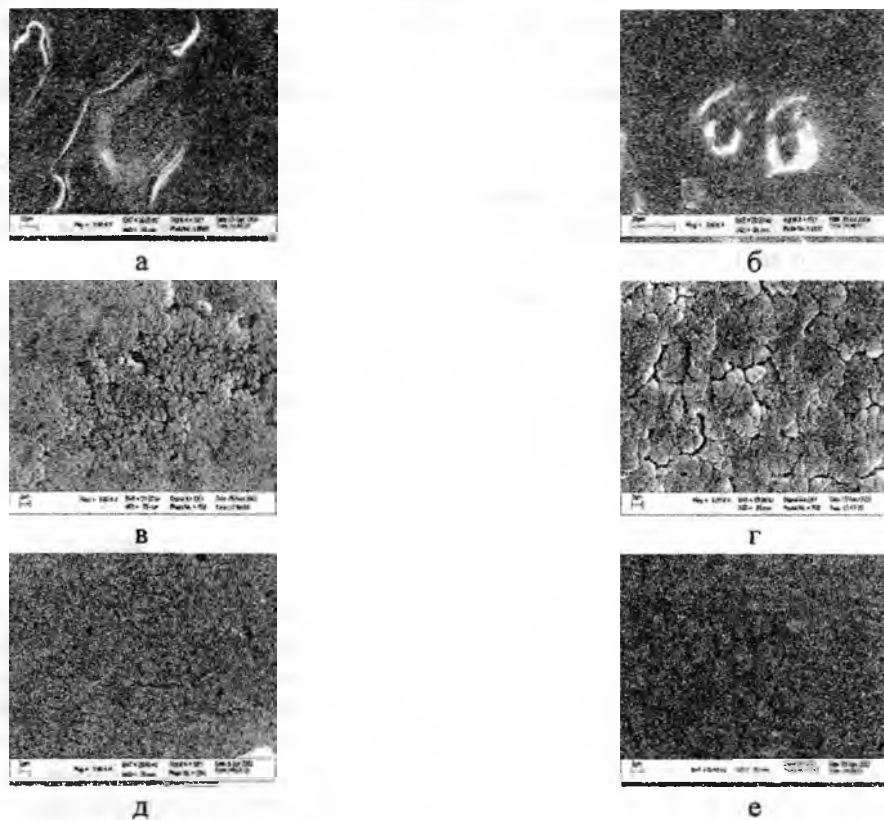


Рис. 1. Структура поверхности быстрозатвердевших фольг алюминия и его сплавов с ПМ (а, в, д, – сторона фольги А; б, г, е – сторона фольги Б); а, б – Al; в, г – Al-1,2 ат. % Ni; д, е – Al-0,4 ат. % Cr.

На рис. 2 представлена кривая распределения интенсивности K_{α} линии легирующего элемента на поверхности быстрозатвердевшей алюминиевой фольги сплава Al-0,6 ат.% Ni. На границах ячеек четко видно увеличение концентрации никеля в сплаве Al-0,6 ат.% Ni. Одной из причин, вызывающих неоднородное распределение чужеродных атомов в поверхностном слое, является их неодинаковая растворимость в твердой и жидкой фазах. Коэффициент распределения $K < 1$ для сплавов Al-Ni и повышенная концентрация никеля наблюдается на границах ячеек [2].

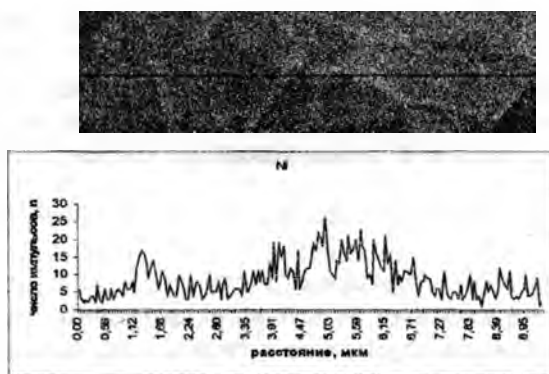


Рис. 2. Кривая распределения интенсивности K_{α} линии никеля на поверхности быстрозатвердевшей алюминиевой фольги сплава Al-0,6 ат.% Ni

Были проведены дополнительные исследования распределения ПМ на границах и в центре ячеек в виде количественного анализа с использованием программного обсчета спектров. При расчете концентрации брали ее значения в 5 точках на границе и в центре ячеек. Исследования подтвердили, что в сплаве Al-0,6 ат.% Ni наблюдается существенная разница - в центре ячеек концентрация никеля равна 0,71 ат.%, а на границе ячеек – 2,10 ат.%. Растворимость Ni в алюминии незначительная (0,05 масс. % [3]), и поэтому даже при малых концентрациях данного легирующего элемента, выделяется фаза Al₃Ni.

Формирование структуры металла обусловлено флуктуациями в слое жидкой фазы, прилегающей к межфазной границе, и зависит от распределения температуры в этой области [4, 5]. С этой целью было изучено распределение температуры в тонком слое жидкости, находящейся в контакте с вращающимся кристаллизатором.

Основным условием закалки является интенсивный отвод тепла от охлаждаемого объекта. Процесс преобразования капли расплава металла в пластинку очень сложный. Поэтому при построении математической модели, описывающей охлаждение, уже образованной пластины предполагается, что ее толщина намного меньше двух других размеров (длины и ширины); она является неограниченной по протяженности. При отсутствии внутренних источников теплоты в пластине дифференциальное уравнение теплопроводности принимает форму уравнения Фурье

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где a (м²/с) – температуропроводность, является мерой теплоинерционных свойств тела; θ – избыточная температура, равная разности между температурами пластины и окружающей среды, τ – время.

В [5] исследовано охлаждение пластины, когда на обеих поверхностях отвод теплоты осуществляется при постоянном во времени коэффициенте теплопередачи α . Показано, что тепловые режимы охлаждения пластины определяются безразмерным числом Био Bi , представляющим отношение внутреннего термического сопротивления теплопроводности к внешнему термическому сопротивлению теплоотдачи

$$Bi = \frac{d / \lambda}{1 / \alpha} = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (2)$$

где d – толщина пластины, λ (Вт/м · К) – коэффициент теплопроводности материала пластины.

Большой интерес для практики представляет случай, когда теплота передается с поверхностей пластины с разной теплоотдачей, т. е. $\alpha_1 \neq \alpha_2$. Не нарушая общности, положим $\alpha_2 > \alpha_1$. Внутри пластины, как и при $\alpha_1 = \alpha_2$, будет находиться изотермическая поверхность с максимальной температурой, которая разделит пластину на два слоя разной толщины. Пусть d_1 – расстояние от поверхности с меньшей теплоотдачей до изотермической поверхности, а $d_2 = d - d_1$ – расстояние от поверхности с большей теплоотдачей до той же изотермической поверхности.

Тогда $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{d_1}{d - d_1}$ из данного равенства находим, $d_1 = \frac{\alpha_1 d}{\alpha_1 + \alpha_2}$ и $d_2 = \frac{\alpha_2 d}{\alpha_1 + \alpha_2}$.

Рассмотрим частные случаи. При $\alpha_1 = \alpha_2$, имеем $d_1 = d/2$ и изотермическая поверхность с максимальной температурой разделяет пластинку на две равные части [5]. При $\alpha_1 \rightarrow 0$ и $d_1 \rightarrow 0$, т.е. изотермическая поверхность стремится к теплоизолированной поверхности пластины. При $\alpha_2 \rightarrow 0$ $d_2 \rightarrow d$ и изотермическая поверхность стремится совпасть с другой поверхностью пластины.

Следовательно, для нахождения распределения температуры по толщине пластины необходимо рассмотреть два слоя, на которые разбита пластина изотермической поверхностью. Располагая на ней систему координат, запишем граничные условия:

$$\text{для слоя толщины } d_1: \text{ при } x = 0 \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, \text{ при } x = -\frac{\alpha_1 d}{\alpha_1 + \alpha_2} \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\alpha_1}{\lambda} \theta;$$

$$\text{для слоя толщины } d-d_1: \text{ при } x = 0 \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, \text{ при } x = \frac{\alpha_2 d}{\alpha_1 + \alpha_2} \frac{\partial \theta}{\partial x} = -\frac{\alpha_2}{\lambda} \theta.$$

Начальное условие запишем в форме при $\tau = 0 \theta = \theta_0 = \text{const}$.

Для решения данных граничных задач необходимо воспользоваться методом, изложенным в [5]. Наибольший градиент температуры достигается в слое, прилегающем к кристаллизатору. По мере удаления от кристаллизатора градиент температуры уменьшается. И для тонкого слоя, контактирующего с атмосферой, градиент температуры стремится к нулю.

Процесс распределения температуры в охлаждаемой фольге дополнительно усложняется из-за выделения теплоты при кристаллизации металла. Ее выделение приводит к уменьшению скорости охлаждения. Но для процесса кристаллизации важно, что градиент температуры в тонком слое, контактирующем с атмосферой, значительно меньше, чем в слоях, прилегающих к медному кристаллизатору. Уменьшение градиента температуры приводит к изменению устойчивости фронта кристаллизации: в слоях, прилегающих к кристаллизатору, плоский фронт кристаллизации является устойчивым, а в слое, контактирующим с атмосферой он теряет устойчивость из-за низкого значения градиента температуры. Вследствие этого кристаллизация в слоях, прилегающих к кристаллизатору, совершается без перераспределения компонентов, т.е. происходит «захват» легирующего элемента. В тонком слое жидкости, заключенном между фронтом кристаллизации и атмосферой, происходят флуктуации энергии и концентрации легирующего элемента, что приводит к образованию ячеистой структуры.

В литых сплавах алюминия с ПМ наблюдается дендритная структура [8]. В местах соприкосновения дендритов образуются микропоры, микроскопические усадочные раковины, что ухудшает механические и физические свойства сплавов. В гранулах алюминиевых сплавов с ПМ (скорость охлаждения $10^3 - 10^4$ град/с) также наблюдали дендритные ячейки. Тщательное исследование поверхности быстрозатвердевших фольг (скорость охлаждения 10^6 К/с) сплавов алюминия с переходными металлами не обнаружило дендритной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотарев С.Н., Шумаков А.Н. Рельеф контактной поверхности быстрозакаленных лент// Физика металлов и металловедение.- Т. 64, вып. 2.- 1987.- С. 349- 357.
2. Салли И.В. Кристаллизация сплавов.- Киев: Наукова думка, 1974.- 239 с.
3. Елагин В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами.- М.: Металлургия, 1975.- 284 с.
4. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния.- М.: Металлургия, 1982.- 168 с.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача.- М.: Энергия, 1975.- 488 с.
6. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы) /Под ред. Б.С. Митина.- М.: «СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ», 1998.- 400 с.
7. Lavernia E.I., Ayers I.D., Srivatsan T.S. Rapid solidification processing with specific applications to aluminum alloys// Intern. Mater. Rev.- 1992.- Vol. 37, № 1.- P. 1-44.
8. Калиниченко А.С., Бергман Г.В. Управляемое направленное затвердевание и лазерная обработка: теория и практика.- Мн.: Технопринт, 2001.-367 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО ПАКЕТА LS-DYNA ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Существование высокопроизводительных вычислительных средств, наличие необходимого математического и программного обеспечения позволяют считать математическое моделирование одним из наиболее эффективных способов оценки прочности, прогнозирования долговечности и оптимизации конструкций технологических процессов производства, в основе которых лежат процессы удара или взрыва. Одной из наиболее эффективных систем автоматизированного инженерного анализа (CAE-системой) является программа LS-DYNA.

LS-DYNA (LSTC) – многоцелевая программа, предназначенная для решения трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости и газа, теплопереноса, а также связанных задач – механики деформированного твердого тела и теплопереноса, механики деформируемого твердого тела и механики жидкости и газа. В настоящее время LS-DYNA считается лучшей коммерческой программой для решения задач соударения, взрыва, обработки металлов давлением и ряда других задач. В программе LS-DYNA реализованы эффективные методы решения перечисленных задач, в том числе явный и неявный метод конечных элементов, многокомпонентная гидродинамика (Multimaterial Eulerian Hydrodynamics), вычислительная гидродинамика несжимаемых потоков, бессеточный метод сглаженных частиц (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics), бессеточный метод, основанный на методе Галеркина (EFG – Element Free Galerkin method). В LS-DYNA реализованы процедуры автоматической перестройки и сглаживания конечно-элементной сетки при вырождении элементов – произвольные Лагранжево-Эйлеровы сетки (ALE – Arbitrary Lagrangian-Eulerian), высокоэффективные алгоритмы решения контактных задач, широкий набор моделей материалов, возможности пользовательского программирования, а также процедуры Лагранжево-Эйлерового связывания и расчета многокомпонентных течений сжимаемых сред на подвижных Эйлеровых сетках. [муйземнек]

При соударении тел из различных материалов характер и механизмы деформации ударника и преград различны. В настоящее время для описания этих процессов разработан и используется ряд различных математических моделей – ньютоновская модель удара, модель Герца, модель Релея и др.

Рассмотрим некоторые возможности программы LS-DYNA для решения задачи о соударении, на примере удара шара о плоскую поверхность. Для простоты расчета, примем, что падение шара происходит под действием силы тяжести. Конечно-элементная модель показана на рис. 1. Ударник и материал изготовлены из стали со следующими усредненными механическими характеристиками:

модуль Юнга $2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона 0.3, плотность 7850 кг/м^3 .

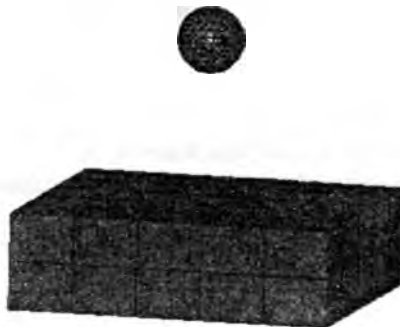


Рис. 1. Конечно-элементная модель

На первом этапе моделирования использовалась недеформируемая модель материала *MAT_RIGID. На рис. 2 а показан график изменения скорости шара при падении на плоскость и отскок от неё. Очевидно, что изменение скорости, полученное при моделировании удара, совпадает с изменением скорости при абсолютно упругом ударе, которому соответствует коэффициент восстановления $k=1$.

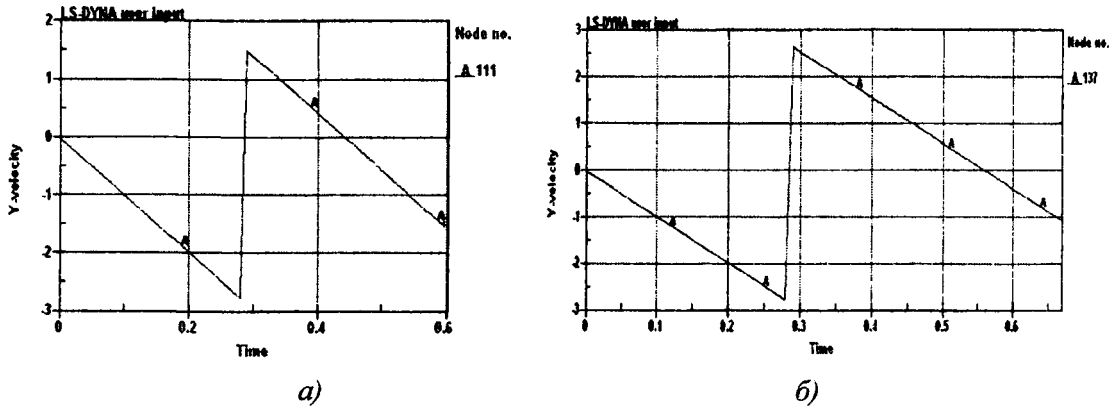


Рис. 2. Графики зависимости скорости шара от времени: а – для упругого удара; б – для неупругого удара

Для моделирования в программе LS-DYNA не абсолютно упругого удара требуется использование пластической модели материала, например *MAT_PLASTIC_KINEMATIC.

Следующей решаемой задачей был неупругий удар стального шарика о стальную поверхность с учётом того, что использовался пластический материал со следующими параметрами:

- модуль Юнга $2 \cdot 10^{11}$ Па,
- коэффициент Пуассона 0.3,
- плотность 7850 кг/м^3 ,
- предел прочности $2 \cdot 10^9$ Па,
- предел текучести $2 \cdot 10^8$ Па.

Ниже на рис. 2(а) представлена зависимость скорости от времени для неупругого удара. Видно, что после удара скорость составляет 0.6 от первоначальной скорости, что совпадает с аналитическими расчетами. Также наблюдается потеря кинетической энергии (рис. 3):

Изменение кинетической энергии при ударе определяется как разность значений кинетической энергии в конце и начале удара:

$$T_2 - T_1 = \frac{m}{2} (V^2 - v^2) \quad (1)$$

Подставляя значения квадратов скоростей в разность значений кинетической энергии, получаем

$$T_2 - T_1 = -\frac{m}{2} (1 - k^2) v_n^2 \quad (2)$$

Таким образом, для стального шара радиусом 0.1 м, массой 32.8 кг потеря кинетической энергии составляла 30 Дж.

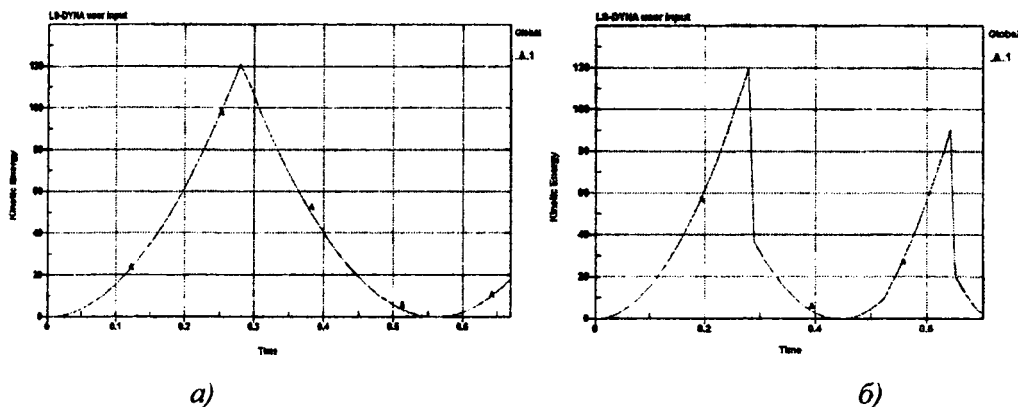


Рис. 3. График зависимости кинетической энергии шара от времени:
 а – для упругого удара; б – для неупругого удара

Одним из вариантов предыдущей задачи неупругого удара является задача внедрения индентора в сыпучую среду (грунт). Для описания поведения грунтов в LS-DYNA существует несколько моделей материалов, наиболее используемые из них: *MAT_GEOLOGIC_CAP_MODEL и *MAT_DRUCKER_PRAGER.

Особенностью моделирования грунтов являются большие деформации сдвига, величина которых превышает сотни процентов. Элементы грунта испытывают очень большие деформации, превышающие размер конечных элементов. Поэтому, если из решения не исключить эти чрезмерно деформируемые или разрушенные элементы, то поведение материала среды становится жестким, иногда говорят, что среда замыкается при сдвиге. Использование конечных элементов с одной точкой интегрирования, применение адаптивных сеток позволяют осуществить численное моделирование процесса деформации вплоть до потери устойчивости. Однако, чрезмерное искажение сетки, часто приводит к невозможности получения адекватного решения как при приближении деформационного процесса к предельной по устойчивости нагрузке, так и в запредельном состоянии.

В конечно-элементном пакете LS-DYNA реализовано несколько подходов к описанию движения сплошной среды. К ним относятся подходы Лагранжа, Эйлера и объединенный подход Лагранжа-Эйлера.

В подходе Лагранжа наблюдается движение материальных частиц сплошной среды. При использовании подхода Лагранжа к описанию движения сплошной среды для пространственной дискретизации чаще всего используется метод конечных элементов. При решении динамических задач метод конечных элементов используется с явной или неявной схемой интегрирования первого или второго порядка.

При использовании подхода Эйлера к описанию движения сплошной среды наблюдатель следит за точками пространства. Неизвестные, которыми, прежде всего, являются скорости движения среды, напряжения и деформации, связаны с точками пространства. Подход Эйлера получил существенно меньшее распространение для решения геотехнических задач, чем Лагранжа. Это обусловлено необходимостью использования дополнительных процедур для определения перемещений сплошной среды, в том числе ее границы, сложностью учета переноса внутренних переменных, которые характеризуют состояние материальных частиц грунта.

Подход Лагранжа-Эйлера, в иностранной литературе, он называется Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation (ALE), сочетает в себе оба подхода.

На основе подхода Лагранжа-Эйлера разработан ряд методов решения задач деформируемого твердого тела. Основными из них являются однокомпонентный метод Лагранжа-Эйлера, многокомпонентный метод Эйлера и многокомпонентный метод Лагранжа-Эйлера.

При решении задач однокомпонентным методом Лагранжа-Эйлера узлы конечно-элементной сетки могут перемещаться в пределах области, которую занимает материал, таким образом, чтобы уменьшить искажения сетки. В каждом конечном элементе содержится один материал.

При использовании многокомпонентного метода Эйлера материал течет через фиксированную в пространстве сетку. При этом каждый элемент может содержать смесь нескольких материалов.

Решения, основанные на методе Лагранжа-Эйлера, имеют преимущества методов Лагранжа и Эйлера при описании движения сплошной среды, не имея в то же время отмеченных выше недостатков.

При решении данной задачи использовался многокомпонентный метод Лагранжа-Эйлера.

На рис. 4 показана конечно-элементная модель для расчета внедрения шарового индентора в грунт. Особенностью моделирования данной задачи является то, что для поверхности также требуется мелкая сетка.

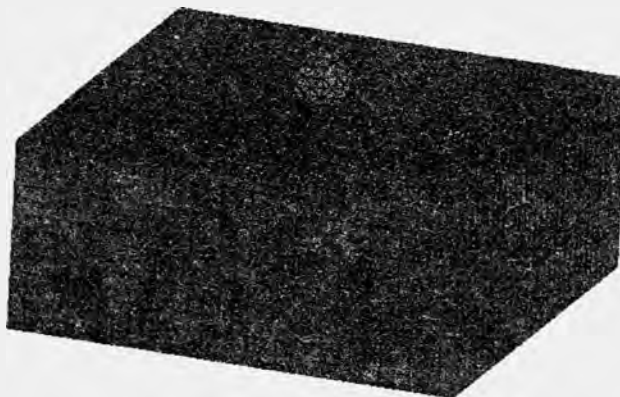


Рис. 4. Конечно-элементная модель

LS-DYNA user input
Time = 0.836
Contours of Y-displacement
min=-0.126386, at node# 421
max=0.00440531, at node# 361



Min/Max Contour
4.405e-01
-8.574e-02
-2.175e-02
-3.489e-02
-4.791e-02
-6.099e-02
-7.407e-02
-8.716e-02
-1.002e-01
-1.133e-01
-1.264e-01

Рис. 5. Внедрение шара в грунт

Компьютерное моделирование в программе LS-DYNA позволяет оценить напряжённо-деформированное состояние как в инденторе, так и в полупространстве, в которое он внедряется (рис. 5).

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что решения, полученные на основе метода конечных элементов, с довольно высокой точностью совпадают с аналитическими решениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. Курс теоретической механики. – Санкт-Петербург: «Лань», 1998. – 732с. 2. М.Ю. Муйземнек, А.А. Богач. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2005. – 106с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО ПАКЕТА LS-DYNA ДЛЯ АНАЛИЗА ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь.*

При проектировании автомобиля все больше и больше внимания уделяется системам безопасности водителя и пассажиров. Автомобильные системы безопасности делятся на активные и пассивные. Первая категория включает в себя все системы машины, которые помогают избежать аварии. Ярчайший пример — ABS (антиблокировочная система тормозов), не допускающая блокировки колес при резком торможении, или ESP (система стабилизации автомобиля), которая исправляет ошибки водителя в повороте. Но если авария все-таки неизбежна, то уповать остается лишь на пассивную безопасность — целый арсенал средств, сберегающий жизни. Здесь и знакомые каждому ремни безопасности, и надувные подушки, и подголовники, оберегающие шейные позвонки, и металлические брусья внутри дверей, защищающие от боковых ударов.

Проверкой пассивной системы безопасности является, так называемый, краш-тест (англ. crash test) — испытание дорожных и гоночных автомобилей на безопасность. Он представляет собой умышленное воспроизведение дорожно-транспортного происшествия с целью выяснения уровня повреждений, которые могут получить его участники. Обычно при проведении краш-теста в машину помещают манекен, оборудованный датчиками для замера повреждений.

Наиболее дешёвым и простым для проведения является лобовой краш-тест. В нём разогнанный автомобиль направляется на бетонный блок. Столкновение автомобиля, движущегося, например, со скоростью 100 км/ч, с бетонным блоком примерно эквивалентно столкновению автомобиля со скоростью 200 км/ч с неподвижным автомобилем такой же массы. В последнее время принято проводить не лобовой краш-тест, а лобовой удар со смещённым центром. В ряде случаев видоизменяется и препятствие — вместо бетонного блока используется стандартизованное подобие встречного автомобиля.

Однако, разработка пассивной безопасности автомобиля только экспериментальной доводкой конструкции практически невозможно из-за высокой стоимости и, особенно на ранних стадиях проектирования, отсутствия в нужном количестве натуральных образцов, а также из-за большого количества параметров, влияющих на результаты. Кроме того, натуральный эксперимент часто может дать лишь конечные характеристики разрушения конструкции при отсутствии информации о характере протекания процессов деформирования. Использование численных методов позволяет оперативно исследовать изменения конструкции с целью поиска наиболее рационального варианта. При этом конструкция автомобиля рассматривается как совокупность большого количества конечных элементов.

Для моделирования динамических, быстропротекающих процессов используется конечно-элементный пакет LS-DYNA. LS-DYNA — многоцелевая программа, использующая явную формулировку метода конечных элементов (explicit finite element method) и предназначена для анализа динамического отклика трехмерных неупругих структур.

Решение контактных задач в LS-DYNA полностью автоматизировано. В решении используются constraint and penalty methods для удовлетворения условий контакта. Эта методика прекрасно зарекомендовала себя и на протяжении последних более чем двадцати лет. LS-DYNA используется в таких сложнейших приложениях, как анализ сопротивляемости удару как целиком автомобиля (или любого транспортного средства), так и отдельных его компонентов, а также анализ безопасности пассажира.

В программе осуществляется более 25 моделей контакта. Большинство из них связано с контактом деформируемых тел, контакт отдельных поверхностей деформируемых тел и контакт деформируемого с абсолютно жестким телом, например

Один из основных краш-тестов, используемых в Европейской ассоциации испытания новых автомобилей EuroNCAP, является фронтальный краш-тест: моделируется лобовое столкновение автомобиля, движущегося со скоростью 64 км/ч, с недеформируемым барьером с областью контакта 40% (рис. 1)

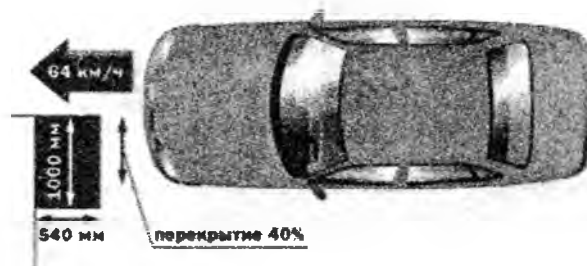


Рис. 1. Фронтальный краш-тест, с областью перекрытия 40%.

На примере расчета фронтального столкновения автомобиля Chevrolet C2500 Pickup (рис. 2) с бетонным блоком, рассматривается использование программы LS-DYNA для моделирования краш-теста.

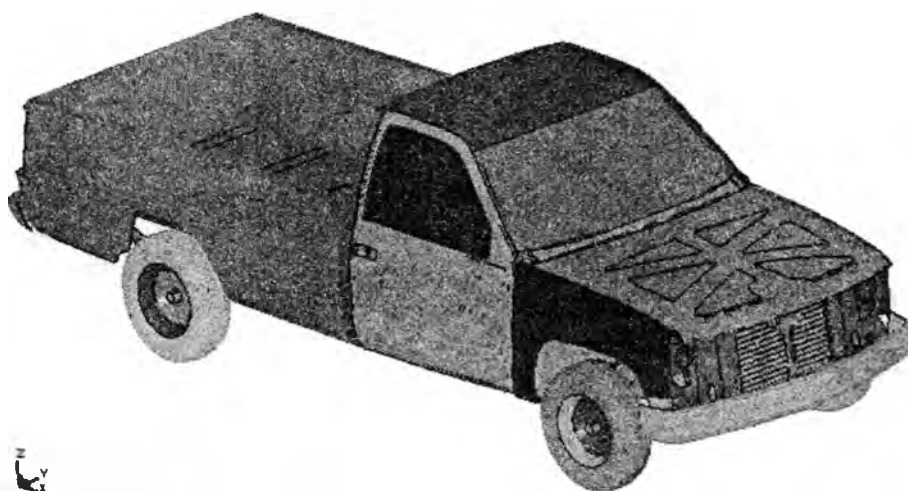


Рис. 2. Конечно-элементная модель автомобиля Chevrolet C2500 Pickup используемая при расчете в программе LS-DYNA.

При создании модели автомобиля используются различные типы конечных элементов: трехмерные, оболочечные, балочные, точечные массы, а также демпферы. Данная модель состоит из 58 000 конечных элементов, которые составляют 248 частей. Используется 8 типов различных материалов.

При проведении краш-теста в качестве барьера использовалась недеформируемая модель железобетонной плиты (рис. 3). Для ее моделирования использовалась модель материала *MAT_RIGID.



Рис. 3. Модель железобетонной плиты, используемой в LS-DYNA.

На рис. 4 представлена расчетная модель столкновения автомобиля и бетонной плиты. Модель автомобиля движется с начальной скоростью 64км/ч и имеет массу 1800 кг.

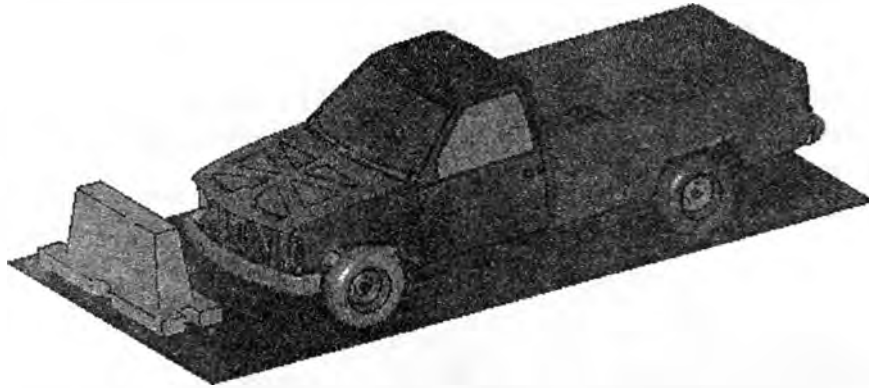


Рис. 4. расчетная модель столкновения автомобиля и бетонной плиты.

На рис. 5 показано деформированное состояние кузова автомобиля после кософронтального столкновения с барьером.

US NCAP: 1994 CHEVROLET C2500 PICKUP
 Time = 0.14
 Contours of Resultant Displacement
 min=0, at node# 2066051
 max=1847.47, at node# 2000177

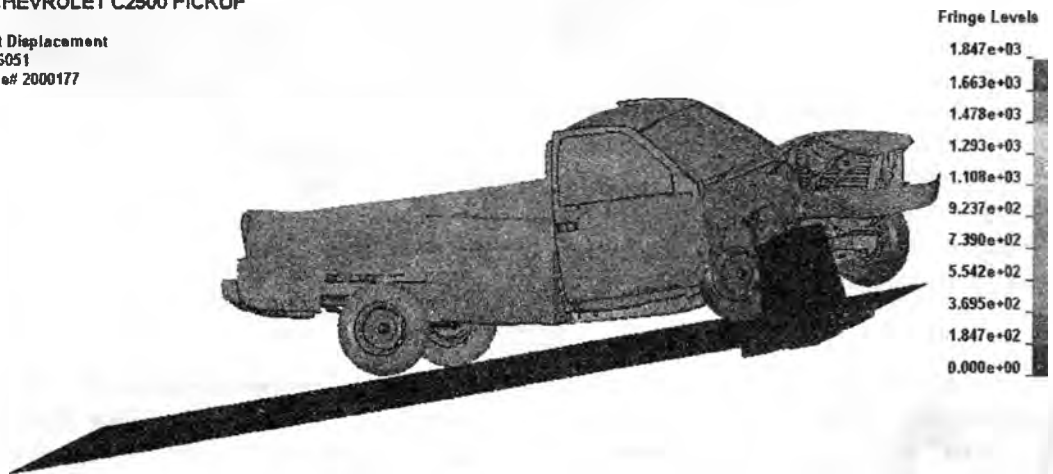


Рис. 5. Изменение перемещений

Использование стандартного препроцессора LS-PREPOST2.1 для обработки результатов расчета позволяет скрыть ряд элементов модели для отображения деталей, расположенных внутри модели. На рис. 6 скрыты боковое и лобовое стекло и видно перемещение подголовника водителя.

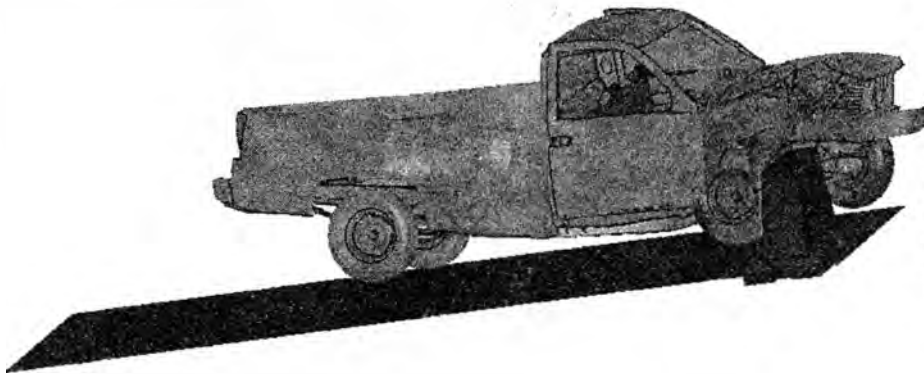
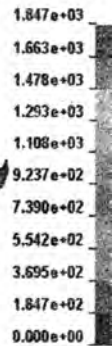


Рис. 6. Изменение перемещений при скрытии капота и лобового и боковых стекол

Важным показателем безопасности транспортного средства является величина ускорения, действующего на водителя и пассажира при столкновении. При отсутствии моделей манекенов измерялись ускорения на спинке и подголовнике кресла. График ускорений представлен на рис. 7.

Анализ графика ускорений показывает, что максимальная перегрузка, воздействующая на зону подголовника, где находится голова водителя, не превосходит 60g в течении менее 20 миллисекунд. Сейчас в мировой практике оценки травмозащищенности головы от перегрузок базируются на так называемой кривой Уэйн-Стейта, описывающей, как пороговое значение перегрузки, при которой не наступает сотрясения мозга, зависит от длительности удара. При анализе максимальные перегрузки интегрируются по времени продолжительности удара. Считается, что значения НИС до 1250 — неопасные, от 1250 до 1500 — говорят о повреждениях средней тяжести, и свыше 1500 — об опасных, смертельных травмах. У лучших автомобилей этот показатель, по данным зарубежных испытаний, лежит в пределах 300—600, у обычных автомобилей — 600—1000. В данном случае НИС не превосходит 700, что является неплохим результатом.

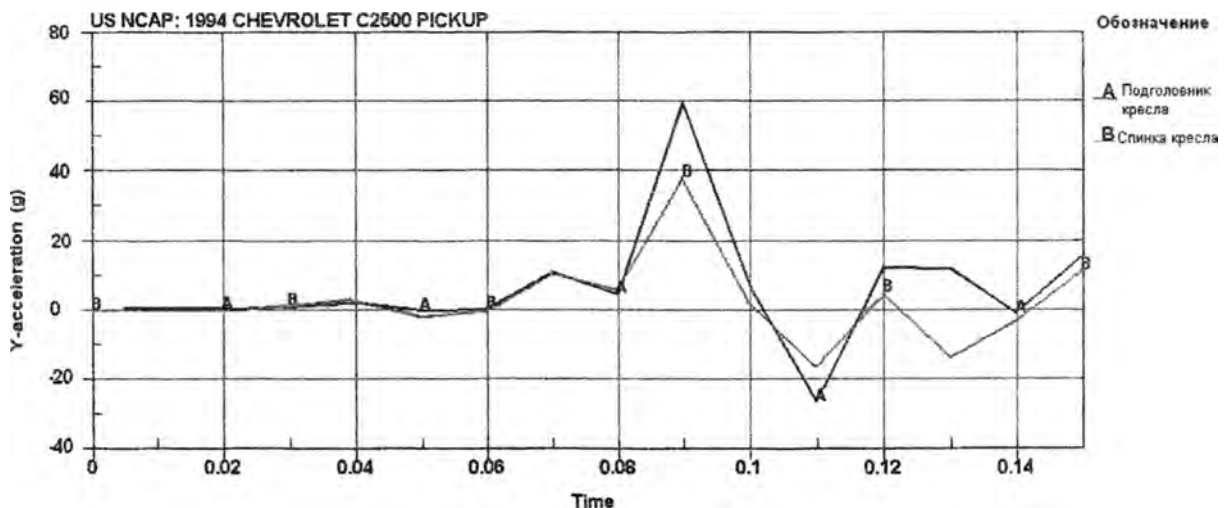


Рис. 7. График изменения ускорения. А – ускорение на подголовнике кресла, В – ускорение на спинке кресла.

Вместе с тем, нельзя однозначно заявить, что автомобиль с меньшим значением НИС более безопасен при фронтальном столкновении, чем автомобиль, у которого НИС больше. И не только потому, что при аварии играют роль и другие опасные ситуации — например, удар по затылку при отскоке или повреждение шейных позвонков при резких вращательных движениях головы после ударов о детали интерьера. Дело в том, что НИС, как и кривая Уэйн-Стейта, носит

статистический характер и отображает лишь вероятную оценку травм головы. Так что критерий НИС нужно рассматривать вместе с другими результатами испытаний.

На сегодняшний день метод конечных элементов является инструментом, полностью интегрированным в процесс проектирования транспортного средства и элементов дороги, обеспечивающих безопасность. Сейчас конкурентоспособное развитие отрасли невозможно без систем конечно-элементного моделирования, которые используются всеми ведущими автомобилестроительными компаниями. Зачастую метод конечных элементов является единственным средством проектирования, так как многочисленные требования и стандарты безопасности превышают возможности организации и анализа результатов натуральных краш-тестов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Бурого, В. Н. Кукуджанов Обзор контактных алгоритмов. – МТТ, 2005, № 1. – С. 45-87. 2. Сайт автосалона AVTERRA (<http://avterra.ru/>) 3. Сайт организации EURONCAP (<http://www.euroncap.com/>) 4. С. К. Черников, А. М. Файзуллин. Использование параллельной версии пакета LS-DYNA при анализе пассивной безопасности автомобилей. Сборник трудов седьмой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH.

УДК 621.793

Соколов И.О., Спиридонов Н.В., Володько А.С., Пилецкая Л.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ВАЛОВ, УПРОЧНЕННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Исследованию изнашивания трущихся тел при неоднородном распределении давлений посвящен ряд работ [1, 2 – 3, 4]. Обобщенное уравнение изнашивания [5]

$$\vartheta_i = c_i V^n p^m (\alpha, t), \quad (1)$$

где V – скорость скольжения м/с;

p – удельная нагрузка, МПа;

α – угол контакта, град;

t – время трения, с;

c , n , m – постоянные характеризующие характер изнашивания и материалы трущихся пар, $1 \leq m \leq 3$, $n=1$ при невысоких скоростях скольжения (V).

Сформулированная в работе [6] усталостная теории изнашивания общепризнанна. Согласно концепции усталостного разрушения при трении скольжения, отделение частиц износа происходит в результате циклических силовых воздействий на приповерхностные объемы материалов трущейся пары. Ввиду дискретности контакта, обусловленного наличием микрорельефа поверхностей трения, при фрикционном взаимодействии тел имеет место циклическое изменение во времени возникающих на действительной площади соприкосновения микронеровностей контактных напряжений. В результате этого в деформированных объемах материала зарождаются микротрещины, которые, развиваясь, смыкаются, приводя к образованию частиц износа.

Как известно, доминирующая роль в процессе зарождения микротрещин при объемной усталости принадлежит сдвиговым касательным напряжениям. Следует предположить, что при трении скольжения, как процессе фрикционной усталости, зарождение и развитие усталостных микротрещин будут также главным образом обусловлены действием касательного силового фактора – удельных сил трения на поверхности контакта тел. На основании этого предположе-

ния в работах [7 – 9] изложен и развит подход исследования кинетики изнашивания материалов при трении скольжения как процесса фрикционной усталости.

Согласно данным работы [7], основная система кинетических уравнений изнашивания имеет вид

$$\frac{dh_i(\alpha, L)}{dL} \Phi_i(\tau) = 1 \text{ или } \frac{dh_i(\alpha, L)}{dL} = \Phi_i^{-1}(\tau), \quad (2)$$

где $h_i(\alpha, L) = 0$ при $L=0$ ($t=0$), $\tau = \tau[\alpha, L, h_i(\alpha, L)]$, $h_i(\alpha, L)L^{-1} = I_{hi}$;

$L = Vt$ – путь трения скольжения.

Учитывая, что интенсивность и скорость изнашивания связаны соотношением

$$I_{hi}(\alpha, L) = V^{-1} \mathcal{G}_i(\alpha, L), \quad (3)$$

Систему (2) можно переписать так:

$$\frac{1}{V} \frac{dh_i(\alpha, t)}{dt} \Phi_i(\tau) = 1 \text{ или } \frac{1}{V} \frac{dh_i(\alpha, t)}{dt} = \Phi_i^{-1}(\tau), \quad (4)$$

Установлено [7 – 9], что характеристические функции износостойкости материалов $\Phi(\tau)$ в координатах $\Phi(\tau) \sim \tau$ (рис. 4.8) графически описываются монотонно убывающими S-образными кривыми. Такого вида графические зависимости названы диаграммами износостойкости (изнашивания) материалов. Чем выше значения $\Phi(\tau)$ материала, тем выше его износостойкость и ниже износ и наоборот.

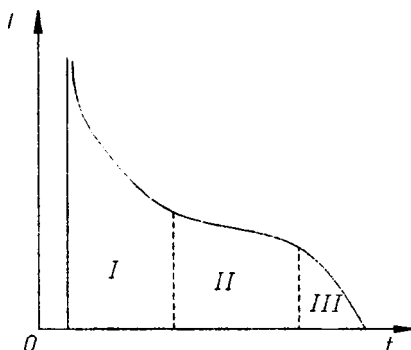


Рис. 1. Общий вид диаграммы износостойкости материалов

Полная диаграмма износостойкости материалов (рис. 1), убывая от асимптоты $\tau = \tau^{(a)}$, стремится к нулю при $\tau = \tau^{(b)}$. В начале области I наблюдаем износ, обусловленный многоцикло-вой усталостью. Далее диаграмма износостойкости материалов монотонно убывает, переходя в области III в зону износа, обусловленного малоцикло-вой усталостью. В предельном случае при $\tau \approx \tau^{(b)}$ разрушение деформируемых приповерхностных объемов материалов трущейся пары произойдет путем одноактного среза. Построение предлагаемых диаграмм позволяет проводить сравнительную оценку износостойкости материалов.

Для аппроксимации экспериментальных значений функции $\Phi(\tau)$ можно использовать два вида соотношений [10].

Полная диаграмма износостойкости материалов (рис. 1), убывая от асимптоты $\tau = \tau^{(a)}$, стремится к нулю при $\tau = \tau^{(b)}$. В начале области I наблюдаем износ, обусловленный многоцикло-вой усталостью. Далее диаграмма износостойкости материалов монотонно убывает, переходя в области III в зону износа, обусловленного малоцикло-вой усталостью. В предельном случае при $\tau \approx \tau^{(b)}$ разрушение деформируемых приповерхностных объемов материалов трущейся пары произойдет путем одноактного среза. Построение предлагаемых диаграмм позволяет проводить сравнительную оценку износостойкости материалов.

Для аппроксимации экспериментальных значений функции $\Phi(\tau)$ можно использовать два вида соотношений [10]

$$\Phi_i(\tau) = A_i \left[\left(\frac{\tau_i^{(b)} - \tau_i^{(0)}}{\tau - \tau_i^{(0)}} \right)^{m_i} - 1 \right], \quad (5)$$

$$\Phi_i(\tau) = \frac{B_i}{[\tau - \tau_i^{(0)}]^{n_i}}, \quad (6)$$

где $\tau_i^{(0)}$ – пороговые значения удельной силы трения, при которых $h_i(\alpha, L) \rightarrow 0$;

A_i, B_i – характеристики изнашивания материалов.

Экспериментально установлено [11], что для нормальных условий изнашивания деталей машин можно построить, по соотношению (6), неполные диаграммы износостойкости материалов, охватывающие области I и II (рис. 1). Полные могут быть построены по соотношению (5) лишь при значениях τ , приближающихся к $\tau^{(b)}$, что для реальных условий работы элементов подвижных сопряжений недопустимо.

Удельная сила трения τ определяется из предположения, что между удельной нагрузкой p и τ существует связь в виде закона Кулона [13,14]

$$\tau[\alpha, L, h_i(\alpha, L)] = fp[\alpha, L, h_i(\alpha, L)], \quad (7)$$

где f – коэффициент трения.

Удельную силу трения τ определяем по формуле (7), приняв $p[\alpha, L, h_i(\alpha, L)] = p_0(\alpha) = const$.

При исследовании кинетики изнашивания трибосопряжений с неоднородным распределением давлений по области контакта, что имеет место в данной задаче, в уравнении изнашивания вводится максимальное значение давления [12]. Тогда уравнение (7) будет таким

$$\tau[\alpha, L, h_i(\alpha, L)] = fp(\alpha), \quad (8)$$

Учитывая сказанное выше, приходим к такой системе дифференциальных уравнений

$$\frac{dh_i(t)}{dt} = \frac{V}{B_i} [fp(\alpha_0) - \tau_i^{(0)}]^{m_i}, \quad (9)$$

Для определения долговечности элементов трибопары необходимо проинтегрировать выражение (4.25) в пределах $0 \leq h_i \leq h_{i*}$ и $0 \leq t_i \leq t_{i*}$ (t_{i*} – нормативная долговечность, h_{i*} – предельно допустимый износ)

$$t_i(\alpha_0) = \frac{h_i}{V} \frac{B_i}{[fp(\alpha_0) - \tau_i^{(0)}]^{m_i}}, \quad (10)$$

$$t_i(\alpha_0) = \frac{L_i L_1}{V} \frac{B_i}{[fp(\alpha_0) - \tau_i^{(0)}]^{m_i}}, \quad (11)$$

где $L_1 = 2\pi R_1$ – путь трения для вала [14],

L_i – интенсивность изнашивания вала, которая определяется по выбранной модели для деталей, работающих в условиях фреттинг-коррозии

$$I = a_1 p A N + (a_2 + a_3 p + a_4 p^2) \frac{N}{f}, \quad (12)$$

где p – удельная нагрузка; A – амплитуда скольжения; N – число циклов нагружения; f – частота колебаний; $a_1 \dots a_4$ – коэффициенты, равные

$$a_1 = -\frac{2k\mu}{c_{11}\Delta\sigma_m}, \quad c_{11} = \frac{6}{d\rho_m}, \quad (13)$$

$$a_2 = \frac{v_0 c_{11} \Delta\sigma_\mu (c_5 A_c - c_6 \Delta\sigma_0 - c_7 \Delta\sigma_\mu) + c_5 A_c^2 + c_8 \Delta\sigma_0 - 2c_6 \Delta\sigma_0 A_c - c_7 \Delta\sigma_m A_c + c_9 \Delta\sigma_0 \Delta\sigma_m}{c_{11} \Delta\sigma_\mu} \quad (14)$$

$$a_3 = \frac{(v_0 c_2 c_{11} \Delta\sigma_m + 2c_2 A_c - 2c_3 \Delta\sigma_0 - c_4 \Delta\sigma_m) b k_5}{c_{11} \Delta\sigma_m \beta} \quad (15)$$

$$a_4 = \frac{c_1 k_5^2 (\eta_1 + \frac{1}{2} \eta_3 F_{\text{тр}}^2)}{c_{11} \Delta\sigma_m \beta^2}, \quad (16)$$

$$b = \frac{1}{12} \left(\sqrt{\eta_1 + \eta_2 F_{\text{тр}} + \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + 4 \sqrt{\eta_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} F_{\text{тр}} \eta_2 + \frac{1}{2} \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + \right. \\ \left. + \sqrt{\eta_1 - \eta_2 F_{\text{тр}} + \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + 4 \sqrt{\eta_1 - \frac{1}{\sqrt{2}} F_{\text{тр}} \eta_2 + \frac{1}{2} \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + 2\sqrt{\eta_1} \right), \quad (17)$$

где $\eta_1 \dots \eta_3$, $c_1 \dots c_9$ – постоянные; k – постоянная, характеризующая долю поверхностной энергии; k_5 – коэффициент пропорциональности; μ – коэффициент трения скольжения; d – размер частиц износа; ρ_m – плотность материала; v_0 – стехиометрический коэффициент окисла в уравнении реакции; $\Delta\sigma_m$ – изменение удельной поверхностной энергии металла; $\Delta\sigma_0$ – изменение удельной поверхностной энергии окисла; A_c – сродство химической реакции; $F_{\text{тр}}$ – коэффициент трения покоя.

Тогда долговечность вала будет определяться по формуле

$$t_1(\alpha_0) = \frac{I_1 2\pi R_1}{V} \frac{B_1}{[fp(\alpha_0) - \tau_1^{(0)}]^{m_1}}. \quad (18)$$

t , мес

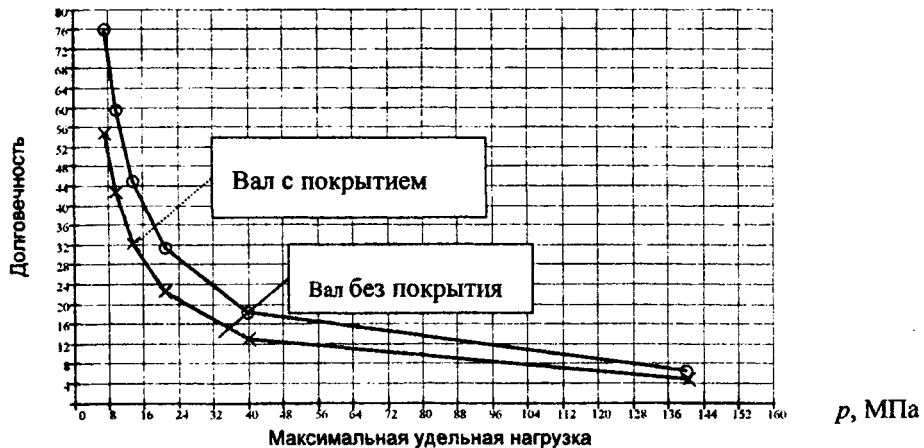


Рис. 2. Зависимость долговечности вала от максимальной удельной нагрузки

На рис. 2 представлены результаты расчета долговечности вала (для опорной поверхности сопряженной с втулкой подшипника) от максимальной удельной нагрузки, которая зависит от угла контакта, материалов сопряженных деталей (покрытий). Полученные данные наглядно демонстрируют эффективность применения газотермического напыления композиционных покрытий, обладающих требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами при повышении долговечности крупногабаритных тяжело нагруженных валов, работающих в условиях фреттинг-коррозии. Повышение долговечности таких валов за счет нанесения покрытий из разработанных композиций в диапазоне удельных нагрузок 8 – 64 МПа составляет порядка 50 % по сравнению с не упрочненными валами.

Таким образом, из проведенных исследований и расчетов следует, что предложенный подход позволяет определять долговечность или износ деталей трущихся при различных видах трения скольжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Uhlig, H.H. – “J. Appl. Mech.”, 1954. – Vol.21. – p.401.
2. Иванова, В.С. Усталость и хрупкость металлических материалов / В.С. Иванова. – М.: Наука, 1968. – 452 с.
3. Спиридонов, Н.В. Исследование износостойкости газотермических покрытий для восстановления прессовых валов бумагоделательных машин / Н.В. Спиридонов, И.О. Соколов, А.С. Володько // Машиностроение: Республиканский межведомственный сборник научных трудов: в 2 т. / под ред. Б.М. Хрусталева. – Минск, 2005. – Вып. 21. Т. 2. – С. 134 – 139.
4. Титченер, Э.Л. Скрытая энергия при наклепе: в сб.: «Успехи физики металлов» / Э.Л. Титченер, М.Б. Бевер. – М.: Metallurgizdat, 1961. – Т.4. – С.34 – 39.
5. Хаазе, Р. Термодинамика необратимых процессов / Р. Хаазе. – Москва, 1967. – 544 с.
6. Сверлин, Р.А. Термодинамика твердого состояния / Р.А. Сверлин. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 520 с.
7. Крагельский, И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
8. Александров В.М., Галин Л.А., Пириев Н.П. // Изв. АН СССР. 1978. №4. – с.58 – 66.
9. Александров В.М., Коваленко Е.В. // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1980. – №3. – С.163 – 172.
10. Александров В.М., Коваленко Е.В. // Трение и износ. 1982. Т.3. №6. – с.1016-1025.
11. Когаев, В.П. Прочность и износостойкость деталей машин: учеб. пособие для машиностр. спец. Вузов / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.
12. Блюмен А.В., Харач Г.М., Эфрос Д.Г. // Вестник машиностроения. 1976. №2. – с.29-32.
13. Голубец, В.М. Метод расчета долговечности опор скольжения турбобура ЗТСШ-195ТЛ / В.М. Голубец, М.В. Чернец // ФХММ, 1992. – №2. – С.95 – 98.
14. Коровчинский М.В. // Контактное взаимодействие трущихся тел и расчет сил трения и износа. М., 1971. с.130-140.
15. Андрейкив А.Е., Панасюк В.В., Чернец М.В. // ФХММ. 1981. Т.17, №2. – с.51-57.

УДК 539.3+612.311

Скляр О.Н.¹, Босяков С.М.², Доста А.Н.³, Казакевич В.А.¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В КОРНЯХ ОПОРНЫХ ЗУБОВ МОСТОВИДНОГО ПРОТЕЗА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКИ

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет

³Белорусский государственный медицинский университет

Минск, Беларусь

Введение. В стоматологической практике при проектировании и конструировании зубочелюстных протезов необходимо учитывать распределение давлений на опорные зубы. Ряд результатов в этом направлении получен в работах [1, 2]. В частности, в монографии [1], найдены выражения для реакций опор мостовидного протеза, опирающегося на четыре опоры равной высоты, а также определены перемещения и углы поворота протеза, возникающие под действием сосредоточенной нагрузки. Настоящая работа развивает это актуальное направление и

содержит результаты определения реакций и реактивных моментов, возникающих в корнях зубов в случае, когда на мостовидный протез, опирающийся на корни однокоренного и двухкоренного зубов, действует сосредоточенная нагрузка.

Математическое моделирование мостовидного протеза. Следуя [1], будем считать корни опорных зубов абсолютно твердыми телами, геометрическая форма которых определяется двумя составными эллиптическими гиперboloидами. Положение корней зубов в системе координат, начало которой совпадет с вершиной небного корня двухкоренного зуба, геометрические размеры корней зубов, мостовидный протез ABC действующая нагрузка и реакции опор показаны на рис. 1.

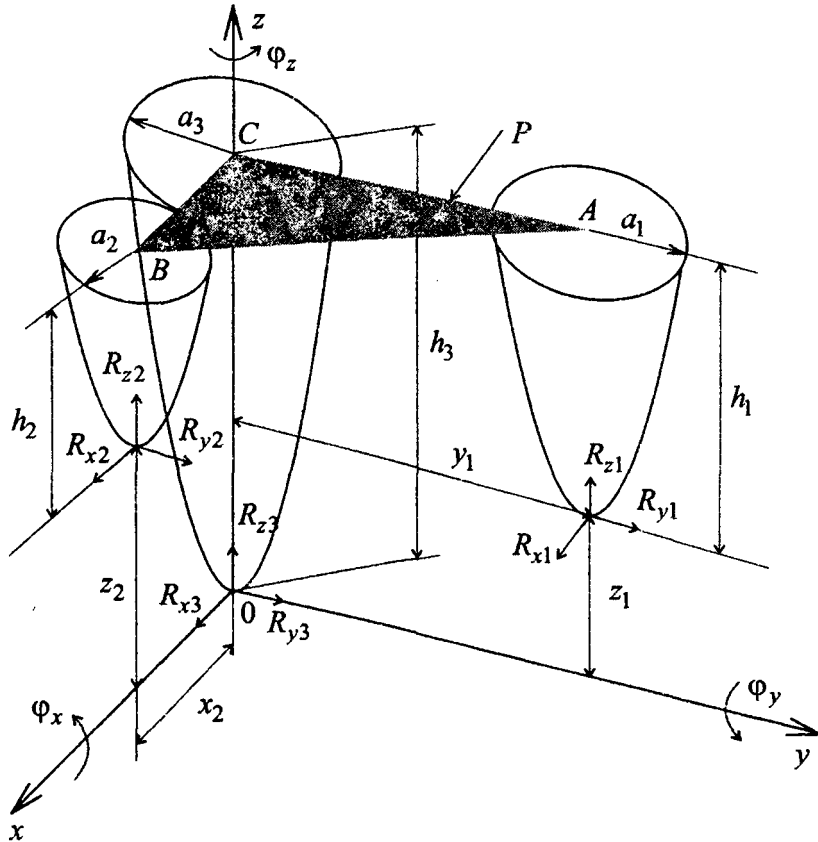


Рис. 1. Схема мостовидного протеза ABC , опирающегося на корни однокоренного и двухкоренного зубов

Распределение нагрузки на корни опорных зубов определяется реактивными силами и моментами сил, которые для каждого зуба имеют составляющие R_{xi} , R_{yi} , R_{zi} и m_{xi} , m_{yi} , m_{zi} , $i = \overline{1, 3}$. Для их определения имеем следующие уравнения равновесия:

$$\sum_{i=1}^3 (R_{xi}) - P_x = 0, \quad \sum_{i=1}^3 (R_{yi}) - P_y = 0, \quad \sum_{i=1}^3 (R_{zi}) - P_z = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m_{x1} + m_{x2} + m_{x3} - R_{y1}z_1 + R_{z1}y_1 - R_{y2}z_2 &= M_x, \\ m_{y1} + m_{y2} + m_{y3} + R_{x1}z_1 + R_{x2}z_2 - R_{z2}x_2 &= M_y, \\ m_{1z} + m_{2z} + m_{3z} - R_{x1}y_1 + R_{y2}x_2 &= M_z. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $P_x = P \cos(\alpha_x)$, $P_y = P \cos(\alpha_y)$ и $P_z = P \cos(\alpha_z)$ – проекции главного вектора внешних сил; α_x , α_y и α_z – углы между линией действия силы и положительным направлением

соответствующих осей координат, $\cos^2(\alpha_x) + \cos^2(\alpha_y) + \cos^2(\alpha_z) = 1$; $M_x = y_f P_z - x_f P_y$, $M_y = z_f P_x - x_f P_z$ и $M_z = x_f P_y - y_f P_x$ – проекции главного вектора внешних сил; x_f , y_f и z_f – координаты точки приложения силы; y_1 и z_1 , x_2 и z_2 – расстояния от вершин корней зубов до осей координат.

Реакции и реактивные моменты можно выразить через поступательные перемещения u_i , v_i и w_i вдоль соответствующих осей координат x , y , z и углы поворота φ_{xi} , φ_{yi} , φ_{zi} корней зубов относительно этих координатных осей следующим образом:

$$\begin{aligned} R_{xi} &= c_{xi} u_i, R_{yi} = c_{yi} v_i, R_{zi} = c_{zi} w_i, \\ m_{xi} &= \mu_{xi} \varphi_{xi}, m_{yi} = \mu_{yi} \varphi_{yi}, m_{zi} = \mu_{zi} \varphi_{zi}, \end{aligned} \quad (3)$$

где c_{xi} , c_{yi} и c_{zi} – жесткости периодонта при поступательных перемещениях корней зубов вдоль координатных осей; μ_{xi} , μ_{yi} и μ_{zi} – жесткости периодонта при поворотах корней зубов относительно координатных осей; u_1 , v_1 и w_1 – перемещения вершины однокоренного зуба; u_2 , v_2 и w_2 – перемещения вершины щечного корня двухкоренного зуба; u_3 , v_3 и w_3 – перемещения вершины небного корня двухкоренного зуба.

Выразим перемещения u_k , v_k и w_k , $k = 1, 2$ через углы поворота протеза и перемещения стержневого корня u_3 , v_3 и w_3 :

$$\begin{aligned} u_1 &= u_3 + z_1 \varphi_y - y_1 \varphi_z, v_1 = v_3 - z_1 \varphi_x, w_1 = w_3 + y_1 \varphi_x, \\ u_2 &= u_3 + z_2 \varphi_y, v_2 = v_3 - z_2 \varphi_x + x_2 \varphi_z, w_2 = w_3 - x_2 \varphi_y. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставим выражения (3) и (4) в систему (1)–(2) и учтем, что в случае круговых сечений корней зубов жесткости периодонта при поступательном перемещении по осям Ox и Oy , а также жесткости периодонта при поворотах около этих осей совпадают ($c_{yi} = c_{xi}$, $\mu_{yi} = \mu_{xi}$). В результате получим следующую систему уравнений относительно перемещений стержневого корня зуба и углов поворота протеза:

$$\begin{aligned} (c_{x1} + c_{x2} + c_{x3})u_3 + (c_{x1}z_1 + c_{x2}z_2)\varphi_y - c_{x1}y_1\varphi_z &= P_x, \\ (c_{x1} + c_{x2} + c_{x3})v_3 - (c_{x1}z_1 + c_{x2}z_2)\varphi_x - c_{x2}x_2\varphi_z &= P_y, \\ (c_{z1} + c_{z2} + c_{z3})w_3 + c_{z1}y_1\varphi_x - c_{z2}x_2\varphi_y &= P_z, \\ (c_{z1}y_1^2 + c_{x1}z_1^2 + c_{x2}z_2^2 + \mu_{x1} + \mu_{x2} + \mu_{x3})\varphi_x - c_{x2}x_2z_2\varphi_z + \\ + c_{z1}y_1w_3 - (c_{x1}z_1 + c_{x2}z_2)v_3 &= y_f P_z - x_f P_y, \\ (c_{z2}x_2^2 + c_{x1}z_1^2 + c_{x2}z_2^2 + \mu_{x1} + \mu_{x2} + \mu_{x3})\varphi_y - c_{x1}y_1z_1\varphi_z + \\ + (c_{x1}z_1 + c_{x2}z_2)u_3 - c_{z2}x_2w_3 &= z_f P_x - x_f P_z, \\ c_{x2}x_2v_3 - c_{x1}y_1u_3 - c_{x2}x_2z_2\varphi_x - c_{x1}y_1z_1\varphi_y + \\ + (c_{x2}x_2^2 + c_{x1}y_1^2)\varphi_z &= x_f P_y - y_f P_x. \end{aligned} \quad (5)$$

После решения системы (5) реакции опорных зубов найдем в соответствии с формулами (3) (результаты решения не приводятся в силу их громоздкости).

Жесткости периодонта при поступательных перемещениях и поворотах корня зуба определим после интегрирования соответствующих выражений, полученных в работе [3], по по-

верхности $F(x, y, z) = z - \frac{h_i}{a_i \sqrt{1+p_i^2} - p_i} \left(\sqrt{x^2 + y^2 + (a_i p_i)^2} - p_i \right)$. После преобразований будем иметь:

$$c_{xi} = c_{yi} = \frac{G\pi(2r_{1i}a_i^2 + (\gamma+1)h_i^2(1-p_i^2r_{2i}))}{2h_{0i}r_{1i}}, \quad c_{zi} = \frac{G\pi(\gamma r_{1i}a_i^2 + h_i^2(1-p_i^2r_{2i}))}{h_{0i}r_{1i}},$$

$$\mu_{xi} = \mu_{yi} = \frac{\pi G}{12h_{0i}} \left(2h_i p_i \sqrt{1+p_i^2} \left(a_i^2 \left(h_i (2\gamma - 6p_i^2 - 1) + 4z_{0i} (2-\gamma) \right) + \right. \right.$$

$$+ 2h_i (1+\gamma) \left(h_i^2 (1+12p_i^4) - 3h_i z_{0i} (1-4p_i^2) + 3z_{0i}^2 \right) -$$

$$- 8h_i \left(h_i^2 (1+\gamma) (4h_i p_i^2 + 6h_i p_i^4 + z_{0i} + 3z_{0i} p_i^2) + \right.$$

$$\left. \left. + a_i^2 \left(2h_i p_i^2 (1+\gamma+3p_i^2) + z_{0i} (1+\gamma+p_i^2(5-\gamma)) \right) \right) \right) +$$

$$+ 3 \left(a_i^4 \gamma + (1+\gamma) h_i^2 \left(h_i^2 (1+10p_i^2 + 24p_i^4 + 16p_i^6) + 4h p_i^2 z_{0i} + 2z_{0i}^2 (1+2p_i^2) \right) + \right.$$

$$\left. \left. + a_i^2 \left(8h_i z_{0i} p_i^2 + 4z_{0i}^2 + h_i^2 (1+2p_i^2) (1+2\gamma+6p_i^2) \right) \right) -$$

$$- 6h_i^2 p_i^2 r_{3i}^2 r_{2i} \left((1+\gamma) (h_i p_i r_{3i} + z_{0i})^2 - a_i^2 p_i^2 \right),$$

$$\mu_{zi} = \frac{\pi G a_i^2}{2h_{0i} r_{1i}} \left(h_i^2 (1-2p_i^2) + a_i^2 r_{1i} + 2h_i^2 p_i^4 r_{2i} \right)$$

где $r_{1i} = \left(\sqrt{1+p_i^2} - p_i \right)^2$, $r_{2i} = \ln(1/p_i^2 + 1)$, $r_{3i} = \sqrt{1+p_i^2} + p_i$, h_i – высота i -го корня зуба, a_i – радиус основания кругового гиперболоида, описывающего i -ый корень зуба, p_i – параметр, характеризующий закругление вершины корня i -го корня зуба, G – модуль сдвига периодонта, $\gamma = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}$, ν – коэффициент поперечной деформации периодонта, $h_{0i} = \delta_i / \sin(\alpha_i)$ – параметр, характеризующий толщину периодонта, δ_i – толщина периодонта i -го корня, $2\alpha_i$ – угол раствора конуса, описываемого уравнением $z = \frac{h_i}{a_i} \sqrt{x^2 + y^2}$, z_{0i} – аппликата центра сопротивления i -го корня зуба. В нашем случае после соответствующих преобразований будем иметь

$$z_{0i} = h_i \left(h_i^2 (2-3p_i^2 - 12p_i^4) (1+\gamma) + 2a_i^2 (1+\gamma + p_i^2 (2-\gamma)) + \right.$$

$$+ p_i \sqrt{1+p_i^2} \left(3h_i^2 (1-4p_i^2) (1+\gamma) - 2a_i^2 (2-\gamma) \right) +$$

$$+ 3h_i^2 p_i^3 r_{2i} \left(p_i (3+4p_i^2) + (1+4p_i^2) \sqrt{1+p_i^2} \right) (1+\gamma) \Big/$$

$$3 \left(2a_i^2 + h_i^2 r_{3i}^2 (1+\gamma + p_i^2 r_{2i} (1+\gamma)) \right). \quad (6)$$

Отметим, что центром сопротивления является точка, через которую проходят линии действия двух горизонтальных и одной вертикальной сил, под действием которых корень зуба получает только поступательные перемещения [1].

Реакции и реактивные моменты. Проведем расчет реакций, возникающих в вершинах корней зубов под действием сосредоточенной нагрузки. В соответствии с работой [4] геометрические размеры корня клыка примем равными $a_1 = 3.5$, $h_1 = 15.7$ мм, $p_1 = 0.5$, щечного корня двухкоренного зуба $a_2 = 1.6$, $h_2 = 13.4$ мм, $p_2 = 0.3$ и небного корня $a_3 = 2.5$, $h_3 = 16.1$ мм, $p_3 = 0.4$. Упругие свойства периодонта описываются постоянными $E = 10$ МПа и коэффициент Пуассона $\nu = 0.15$. Поскольку толщина периодонта для различных групп зубов практически одинакова, принимаем для всех корней зубов $\delta_i = 0.25$ мм [1]. В этом случае $h_{01} = 1.12$, $h_{02} = 2.1$ и $h_{03} = 1.61$ мм. Геометрические параметры, характеризующие удаление вершин корня от осей координат составляют $y_1 = 15$, $z_1 = 0.4$, $x_2 = 4.1$ и $z_2 = 2.7$ мм. На рис. 2 и 3 представлены зависимости отношений R_i/P и $m_i/(Pl_0)$ от угла α_x в плоскости x_0z ($\alpha_y = \pi/2$, $R_i = \sqrt{R_{xi} + R_{yi} + R_{zi}}$, $m_i = \sqrt{m_{xi} + m_{yi} + m_{zi}}$, $i = 1, 3$, $l_0 = 1$ мм). При построении считаем, что сила приложена к коронке протеза и координаты точки приложения силы составляют $x_f = 0$, $y_f = 0$ и $z_f = 16.8$ мм.

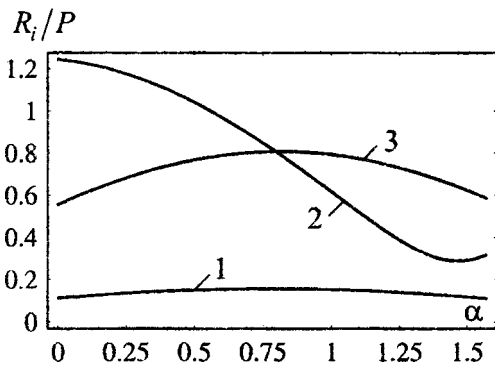


Рис. 2. Зависимости отношений реакций к модулю силы R_i/P , действующей на протез, от угла α_x в плоскости x_0z : 1 – R_1/P ; 2 – R_2/P ; 3 – R_3/P

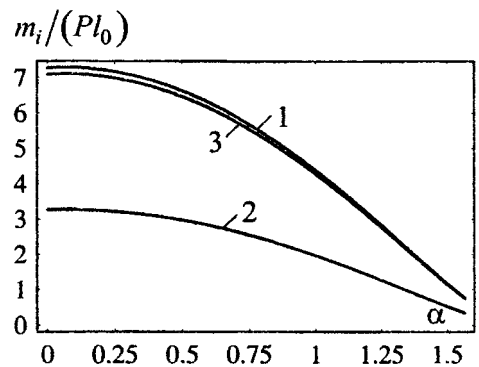


Рис. 3. Зависимости отношений $m_i/(Pl_0)$ от угла α_x в плоскости x_0z : 1 – m_1/Pl_0 ; 2 – m_2/Pl_0 ; 3 – m_3/Pl_0

Из рис. 2 видно, что при изменении угла α_x от 0 до $\pi/4$ наибольшей является сила давления щечного корня двухкоренного зуба на периодонт, причем для углов близких к 0 сила давления может превышать по абсолютной величине действующую нагрузку. При изменении угла α_x от $\pi/4$ до $\pi/2$ сила давления небного корня на периодонт превышает все остальные силы давления. Учитывая зависимости для реактивных моментов, представленные на рис. 3, можно сделать вывод о том, что в вестибуло-оральной плоскости наиболее неблагоприятными являются углы приложения нагрузки α_x , изменяющиеся от 0 до $\pi/4$, поскольку в этом случае максимальных значений достигают как силы давления корней зубов на периодонт, так моменты сил, которые приводят к закручиванию периодонта. Максимальные моменты сил действуют на периодонт небного корня и клыка.

Рассмотрим зависимости отношений R_i/P и $m_i/(Pl_0)$ при $\alpha_x = \pi/4$ и $\alpha_y = \pi/2$ от координаты точки приложения нагрузки y_f , изменяющейся от 0 до $y_1 = 0.015$ м вдоль направляющей CA . Остальные численные данные, необходимые для расчета принимаем прежние. Результаты построения представлены на рис. 4 и 5.

Из рис. 4 видно, что сила давления на периодонт корня клыка практически линейно возрастает при приближении вдоль направляющей CA мостовидного протеза точки приложения нагрузки к точке A корня клыка. При этом силы давления на периодонт корней двухкоренного зуба уменьшаются. Согласно рис. 5, моменты сил, действующие на периодонт корней всех

опорных зубов, незначительно уменьшаются при изменении координаты y_f от 0 до y_1 . Наибольшее действие момента сил испытывает периодонт клыка, наименьшее – периодонт щечно-го корня двухкоренного зуба.

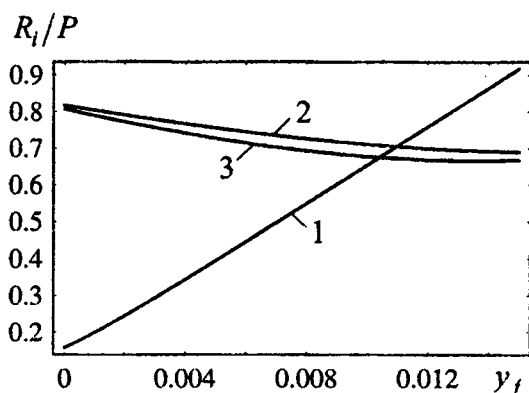


Рис. 4. Зависимости отношений реакций к модулю силы R_i/P , действующей на протез, от координаты точки приложения нагрузки при $\alpha_x = \pi/4$ и $\alpha_y = \pi/2$: 1 –

R_1/P ;
2 – R_2/P ; 3 – R_3/P

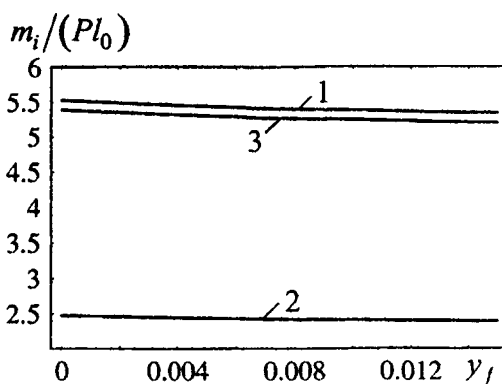


Рис. 5. Зависимости отношений $m_i/(Pl_0)$, от координаты точки приложения нагрузки при $\alpha_x = \pi/4$ и

$\alpha_y = \pi/2$: 1 – m_1/Pl_0 ;
2 – m_2/Pl_0 ; 3 – m_3/Pl_0

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы для расчета перемещений корней зубов, являющихся опорами мостовидного протеза и определения напряжений, возникающих в периодонте вследствие действия на протез сосредоточенных нагрузок. Работа выполнена при поддержке Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь (проект «Разработать методику автоматизированного проектирования и оптимизации конструкций зубочелюстных протезов и ортодонтических аппаратов при аномалиях и деформациях челюстно-лицевой области, обусловленных расщелинами губы и неба, с применением универсальных CAD/CAE/CAM-систем»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Наумович С.А., Крушевский А.Е. Биомеханика системы зуб – периодонт. – Мн., 2000 – 132с.
2. Чуйко, А.Н. Особенности биомеханики в стоматологии / А.Н. Чуйко, В.Е. Вовк. – Харьков: Прапор, 2006. – 304 с.
3. Крушевский, А.Е. Основы биомеханики мостовидных протезов / С.С. Наумович, А.Е. Крушевский // Теоретическая и прикладная механика. – 2006. – Вып. 20. – С. 134 – 139.
4. Наумович, С.А. Антропометрические данные коронок и корней зубов и их значение в стоматологии / С.А. Наумович, Р.А. Батура, С.Н. Пархамович // Стоматологический журнал. – 2002. – №2. – С.21 – 22.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Процесс создания и существования технических объектов постоянно эволюционирует. От кустарных ремесленников, работавших в одиночку без чертежей и расчетов, техника пришла к коллективному автоматизированному производству, где часть операций выполняет сама техника. На сегодняшний день за время своего существования изделие проходит ряд состояний от идеи до утилизации. Совокупность этапов или последовательность процессов, через которые проходит изделие за время своего существования, называется жизненным циклом изделия. Основные этапы жизненного цикла оптического прибора представлены на нижеприведенной схеме:

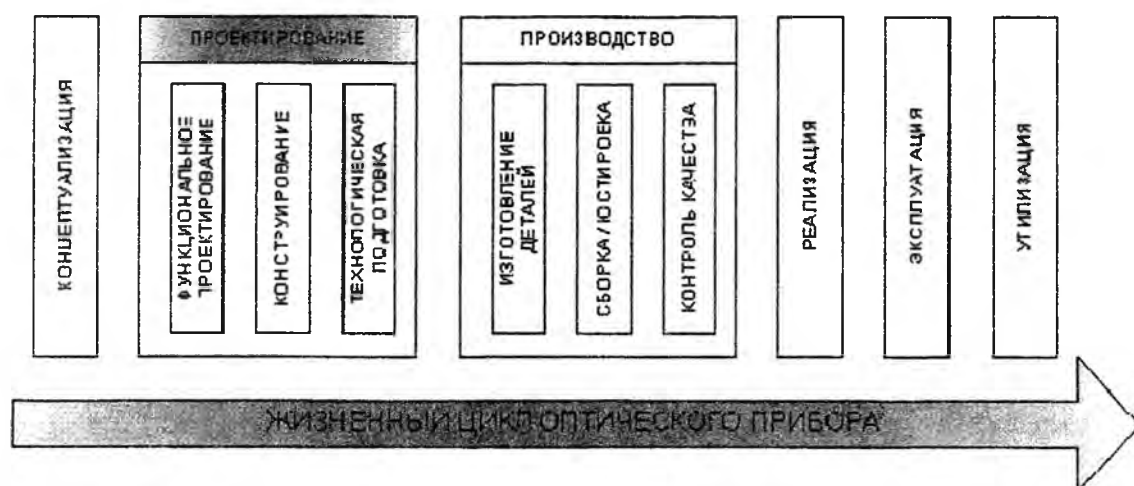


Рис. 1

Жизненный цикл оптического прибора начинается после маркетинговых исследований, которые проводят производители в поиске потребителей своих идей или заказчики в поиске исполнителей своих задач и потребностей. На первом этапе жизненного цикла, который иногда называют концептуализацией, осуществляется технический анализ и формальное определение потребностей, а также оценивается возможность физической реализации изделия, которое удовлетворит потребности, будет при этом конкурентоспособным и экономически выгодным. Заказчик и исполнитель формализуют свои потребности и идеи в виде документа, который называется техническое задание. Когда техническое задание сформулировано и есть уверенность, что оно будет полностью реализовано, переходят к проектированию.

Проектирование можно разбить на три отдельных ветви, работа в которых часто ведется параллельно: функциональное, конструкторское и технологическое проектирование. Объектами функционального проектирования являются схемы прибора. Объектами конструкторского проектирования (или просто конструирования) являются пространственная (твердотельная) структура прибора. На этапе конструирования спроектированные схемы предстают в виде реальных деталей и сборочных единиц, расположенных в пространстве и закрепленных вполне определенным образом. Объектами технологического проектирования являются технологические процессы изготовления деталей прибора, его сборки, юстировки, испытания.

Производство оптических изделий обычно сопровождается специфическими процедурами контроля оптических свойств отдельных деталей или всего изделия в целом. Важным этапом является сборка и юстировка оптических каналов прибора, в процессе которой требуется

моделирование работы уже изготовленного прибора и его оптимизация. Жизненный цикл оптического изделия продолжают реализация и эксплуатация, а завершает утилизация.

Первоначальное формирование конструкционной модели оптической системы может происходить при помощи специальных компьютерных программ синтеза оптических систем с требуемыми характеристиками. Затем наступает этап анализа, на котором рассчитывается ход лучей через оптическую систему и по различным характеристикам определяется качество оптической системы. К параметрам, позволяющим оценить качество оптического изображения, относятся параксиальные характеристики, величины aberrаций, габариты пучков, а также различные специальные критерии качества, принятые в оптике. Дальнейшее изменение конструктивных параметров оптической системы для достижения требуемых значений характеристик качества возможно при помощи программ оптимизации.

Общая схема технологического процесса изготовления линз представляет собой сложное дерево с многочисленными этапами и представлено на схеме, показанной на рис. 2.

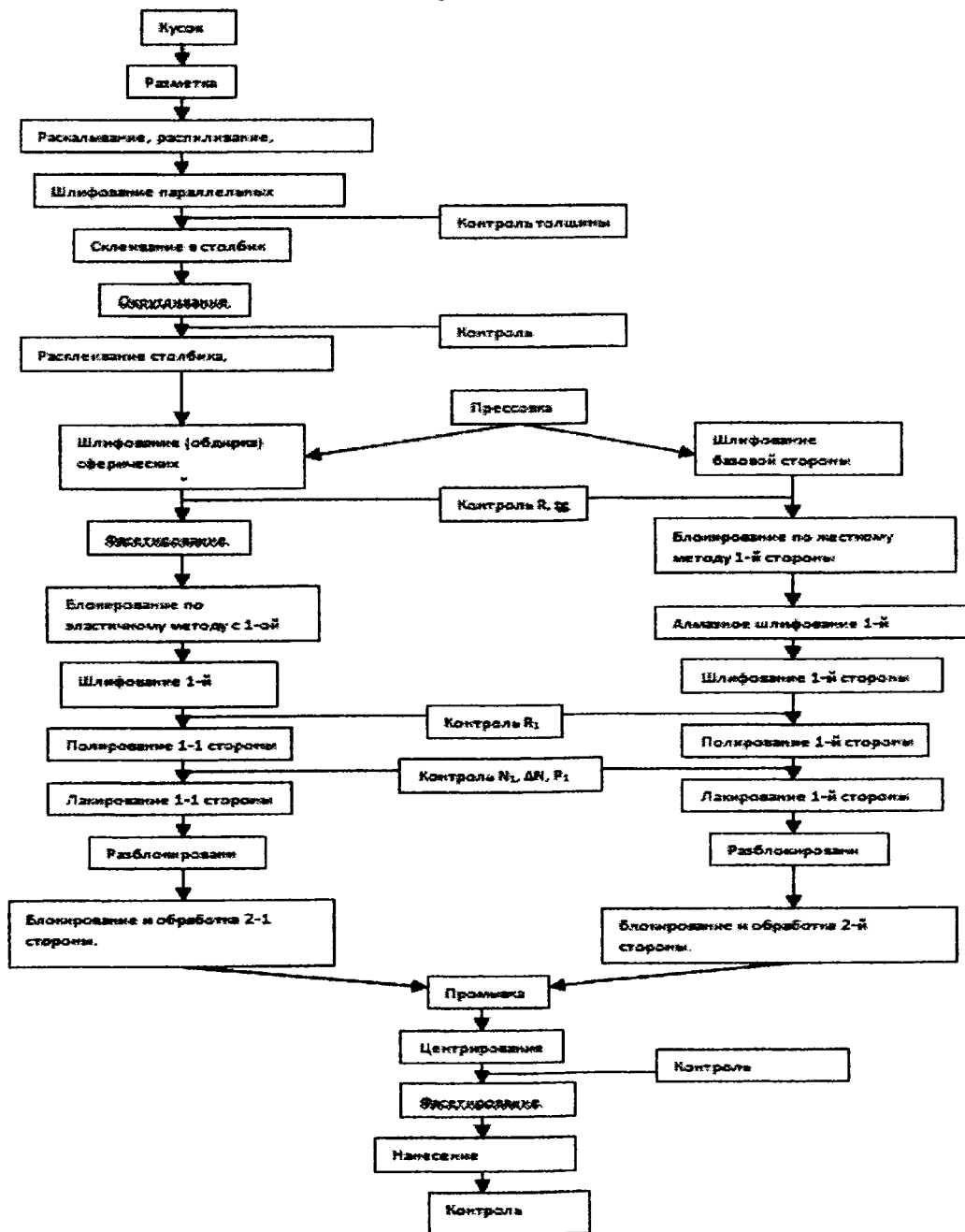


Рис. 2

В данной работе создана модель формообразования поверхности при помощи мелко-дисперсных абразивов. Движение обрабатывающего инструмента по линзе может осуществляться как по растровым траекториям, так и по спирали. Особенностью является то, что инструмент осуществляет сьем материала за один проход лишь на определенных участках, выбранных по условию максимума и с учетом некоторых ограничений.

Модель формообразования поверхности и сам процесс обработки созданы на основе использования пакета Mathematica.

Система Mathematica относится к программным продуктам, которым крайне трудно найти достойного конкурента. Высочайшая эффективность решения численных задач, превосходная графика и постоянно совершенствующиеся возможности символьной (аналитической) математики — это и есть лицо системы Mathematica.

Mathematica, действительно представляет собой самую современную систему искусственного интеллекта, ориентированную на выполнение разнообразных математических вычислений — от простейших до самых сложных, достойных ума и пера математиков-аналитиков.

Одновременно эта система является уникальным по своей полноте «живым» справочником по различным математическим понятиям, алгоритмам и функциям. Она обеспечивает высочайшую степень визуализации вычислений, начиная от представления исходных данных и кончая выводом промежуточных и конечных результатов вычислений. Таким образом, главным для системы становится предоставление пользователю самых серьезных и, порой, новых знаний в столь почетной и древней области человеческого интеллекта, как математика.

Идеология систем Mathematica базируется на двух, казалось бы, взаимно исключающих друг друга положениях:

- решение большинства математических задач в системе может производиться в диалоговом режиме без традиционного программирования;
- входной язык общения системы является одним из самых мощных языков функционального программирования, ориентированных на решение различных задач (в том числе математических).

Противоречивость этих положений кажущаяся. На самом деле Mathematica — типичная система программирования с проблемно-ориентированным языком программирования сверх-высокого уровня. Его можно отнести к классу интерпретаторов. Как известно, языки такого типа последовательно анализируют (интерпретируют) каждое выражение и тут же исполняют его. Таким образом, работа с системой происходит явно в диалоговом режиме.

Основной целью данной работы явилась задача проектирования алгоритма шлифовки линзы с изначально заданным набором параметров. В данном случае решение данной задачи сводится к нахождению времени нахождения шлифовального инструмента на определенном радиусе поверхности линзы. Для решения данной задачи разобьем поверхность линзы на одинаковые элементарные площадки и каждую площадку обозначим точкой.

Интенсивность съема в общем виде при нахождении инструмента на участке может задаваться пользователем в виде формул, входящих в нижеприведенный цикл:

```

For [ i = 1, i < ii,
  H[[ $\pi$  * i2 - 1]],  $\pi$  * i2 - 1]] = H[[ $\pi$  * i2 - 1]],  $\pi$  * i2 - 1]] - myPart;
  If [ i > 1 && H[[ $\pi$  * i2 - 1]],  $\pi$  * i2 - 1]] >  $\frac{myPart}{3}$ , H[[ $\pi$  * i2 - 1]],  $\pi$  * i2 - 1]] = H[[ $\pi$  * i2 - 1]],  $\pi$  * i2 - 1]] - 0.33333 * myPart ];
  If [ i < n && H[[ $\pi$  * i2 - 1]],  $\pi$  * i2 - 1]] >  $\frac{myPart}{3}$ , H[[ $\pi$  * i2 - 1]],  $\pi$  * i2 - 1]] = H[[ $\pi$  * i2 - 1]],  $\pi$  * i2 - 1]] - 0.33333 * myPart ];
  i ++ ];

```

Рис.3

Таким образом, нахождение неизвестного параметра можно свести к решению матричной системы уравнений, полученной при создании программного кода, при помощи функции LinearSolve.

Пакет Mathematica позволил без затруднений осуществить процесс формообразования. Алгоритм шлифовки линзы приведен на следующей диаграмме.

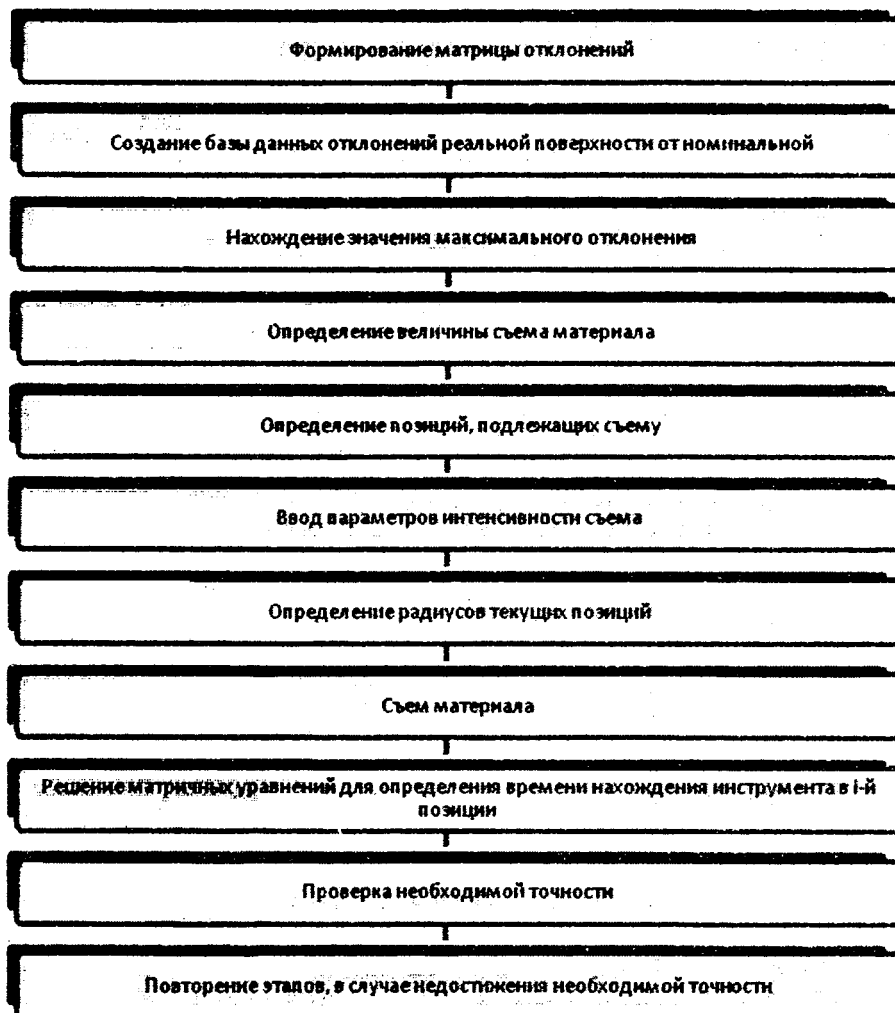


Рис. 4

Модель реальной детали формируется методом реализации поверхности, подлежащей обработке. Благодаря мощному математическому потенциалу пакета Mathematica, высоты поверхностей профиля автоматически задаются функцией Random из интервала $0 \dots 2$ мкм, таким образом, создается изображение поверхности с заданным значением шероховатости. При помощи функций For и If пакета Mathematica создается база данных отклонений реальной поверхности от номинальной в узлах прямоугольной сетки. База создается в виде матрицы, ранг которой зависит от размеров детали и выбранного шага. В автоматическом режиме, посредством сортировки в циклах For и функции Take, решаются задачи поиска максимальных значений отклонений, нахождения значений отклонений входящих в определенный интервал съема, определения среднего значения съема для строки, задаются параметры необходимые для определения интенсивности съема, радиусы текущих позиций съема. На полученном в процессе реализации ряда вышеприведенных задач графе, решается задача маршрутизации центра пятна

контакта инструмента по критерию минимума времени для первого цикла формообразования. Далее производится непосредственная реализация процесса съема материала с поверхности.

После проведения вышеперечисленных этапов обработки, производится корректировка базы данных отклонений и оценка значений отклонений на данном этапе (после цикла обработки). В случае если значения отклонений превышают необходимую величину точности, все приведенные выше этапы повторяются до тех пор, пока точность не будет достигнута.

Процесс создания качественных оптических изделий является крайне трудоемким и требует значительной точности. Реализация этого процесса состоит из большого числа этапов, начиная от проектирования и заканчивая непосредственно созданием линзы.

После изучения этапов создания изделия, в пакете Mathematica был разработан алгоритм процесса формообразования поверхности линзы и ее шлифовки на станке с ЧПУ. Данный пакет позволил быстро и точно решить набор матричных систем уравнений, необходимых при моделировании для нахождения значения времени пребывания шлифовального инструмента в определенной позиции.

Стоит отметить, что использование интерактивного математического пакета для расчетов значительно ускорило и упростило процесс создания алгоритма. Данный алгоритм позволяет выполнять формообразование до требуемого пользователем качества поверхности (величины итоговой погрешности съема) и применять различные значения основных параметров изделия, не изменяя при этом сам алгоритм.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Шехотин, В.М. Домненко, О.А. Гаврилина. Методология проектирования оптических приборов - Санкт-Петербург: Эксм-Групп 2004. 2. М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А. Байгожик. Справочник технолога-оптика. - Санкт-Петербург: Эксм-Групп 2004. 3. Сайт компании Lambda Research Corporation (<http://www.lambdares.com>). 4. Сайт компании Optical Research Associates (<http://www/opticalres.com>). 5. Сайт компании ZEMAX Development Corporation (<http://www.zemax.com>). 6. Н.Д. Толстолоба. Системы автоматизированного проектирования и конструирования. - Санкт-Петербург: Эксм-Групп 2002. 7. А.М. Дальский, А.Г. Кислова, Р.К. Мещеряков. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х частях. М.: Машиностроение. - 2001. 8. В.Г. Зубаков, М.Н. Семибратов, С.К. Штандель. Технология оптических деталей. М.: Машиностроение. - 2005, 368с.

УДК 621.81:539.4

Чигарев А.В., Ручан М.В., Шукевич Т.В.

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Постановка задачи.

Рассчитать напряженно-деформированное состояние трубы с внутренним и внешним радиусами $R_1=1.40$ м и $R_2=1.5$ м соответственно, находящейся под действием внутреннего давления $P=400$ МПа.

Поскольку в рассматриваемой цилиндрической трубе нагрузка не изменяется по длине трубы, то напряжения, деформации и перемещения зависят только от двух координат, то есть имеет место плоская задача. Данная задача сводится, по существу, к идентичной математической задаче, что позволяет использовать при ее решении одинаковые математические методы. В теории упругости различают два типа плоских задач: плоская деформация и плоское напряженное состояние. Так как объектом рассматриваемой задачи является бесконечно длинная труба, а внешняя нагрузка представляет собой поперечную силу, не изменяющуюся по длине трубы, то типом рассматриваемой плоской задачи является плоская деформация.

Для решения данной задачи целесообразно воспользоваться цилиндрической системой координат r, θ, x_3 , так как труба имеет форму тела вращения. В случае плоской задачи координата x_3 не участвует в решении, и компоненты напряжений, деформаций и перемещений являются функциями только r и θ . В этом случае удобнее воспользоваться полярными координатами.

Задача о расчете цилиндра решается с учетом равномерно распределенного внутреннего давления P . Мы исходим из того, что такая нагрузка не может вызвать деформации изгиба цилиндра. Нормальные напряжения σ_θ в сечениях плоскостями, перпендикулярными оси симметрии O цилиндра нельзя считать равномерно распределенными по толщине стенки, как это делается при расчете тонкостенных оболочек вращения.

Вывод формул расчета напряжений в толстостенных цилиндрах основан на том, что для них соблюдается гипотеза плоских сечений, т.е. поперечные сечения цилиндра, плоские до нагружения, останутся плоскими и после нагружения.

Для расчетной схемы трубы, представленной на рис. 1, запишем следующие граничные условия:

$$\sigma_{rr} = 0 \text{ при } r = R_2; \sigma_{\theta\theta} = -p \text{ при } r = R_1$$

Рассмотрим равновесие малого элемента тела (рис 2). Составляющие объемной силы в радиальном и тангенциальном направлениях обозначим R_r, R_θ . Проецируя действующие силы на радиальное и перпендикулярное ему направления.

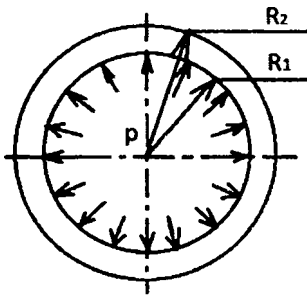


Рис. 1

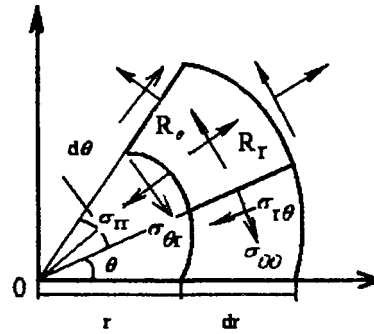


Рис. 2

Получим дифференциальные уравнения равновесия элемента тела в полярных координатах:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} + R_r = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{2\sigma_{r\theta}}{r} + R_\theta = 0. \quad (1)$$

Введем функцию напряжений $\varphi(r, \theta)$, тогда уравнения равновесия примут вид:

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} - r \cdot R_r; \quad \sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} - r \cdot R_r; \quad \sigma_{r\theta} = 0, \quad (2)$$

$\sigma_{r\theta} = 0$ так как рассматриваемая задача является осесимметричной, то есть $\varphi(\theta) = const$.

Решением системы (2) д.у. будет:

$$\varphi = Ar^2 \cdot \ln r + B \cdot \ln r + Cr^2 + D, \text{ тогда согласно (1) имеем:}$$

$$\sigma_{rr} = A(2 \ln r + 1) + 2B + \frac{C}{r^2}; \quad \sigma_{\theta\theta} = A(2 \ln r + 1) + 2B - \frac{C}{r^2}; \quad \sigma_{r\theta} = 0. \quad (3)$$

Поскольку труба находится в условиях плоской деформации, тогда согласно (5) и (6) имеем:

$$\frac{dU}{dr} = \frac{1+\mu}{E} ((1-\mu)\sigma_{rr} - \mu\sigma_{\theta\theta}); \quad \frac{U}{r} = \frac{1+\mu}{E} ((1-\mu)\sigma_{\theta\theta} - \mu\sigma_{rr}), \quad (4)$$

где (5) – условия плоской деформации:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1+\mu}{E} ((1-\mu)\sigma_{rr} - \mu\sigma_{\theta\theta}); \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1+\mu}{E} ((1-\mu)\sigma_{\theta\theta} - \mu\sigma_{rr}); \quad \varepsilon_{r\theta} = \frac{1+\mu}{E} \sigma_{r\theta}, \quad (5)$$

и (6) – условия плоской деформации через перемещения:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial U_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{U_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta}; \quad 2\varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U_r}{\partial \theta} + \frac{\partial U_\theta}{\partial r} - \frac{U_\theta}{r}. \quad (6)$$

Умножая второе уравнение системы (4) на r , дифференцируя один раз по r и приравнявая к правой части первого уравнения, получим $A=0$. Две остальные постоянные найдем из Г.У.:

$$2B = -\frac{C}{R_2^2}; \quad C = \frac{p \cdot R_1^2 \cdot R_2^2}{R_1^2 - R_2^2}. \quad (7)$$

Эпюры напряжений для решаемой задачи представлены на рис. 3. Окружное напряжение является расширяющим, а радиальное – сжимающим. Соответствующие выражения для напряжений имеют вид:

$$\sigma_{rr} = \frac{p \cdot R_1^2}{R_1^2 - R_2^2} \left(1 - \frac{R_2^2}{r^2}\right); \quad \sigma_{\theta\theta} = \frac{p \cdot R_1^2}{R_1^2 - R_2^2} \left(1 + \frac{R_2^2}{r^2}\right); \quad \sigma_{r\theta} = 0, \quad (8)$$

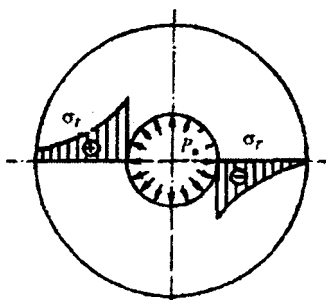


Рис.3. Эпюры напряжений.

Для численного решения поставленной задачи воспользуемся методом конечных элементов, используя инженерный пакет ANSYS. Полученные результаты представлены на рис. 4-5. Сравним полученные результаты эквивалентных напряжений с аналитическим расчетом.

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2))},$$

где σ_x, σ_y - нормальные напряжения, соответственно равны 14690 МПа и 14710 МПа;

σ_{xy} - касательные напряжения, соответственно равны 15040 МПа и -15040 МПа;

$\sigma_z = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$, так как плоская задача.

Тогда $\sigma_{\text{экв}} = 29910$ МПа.

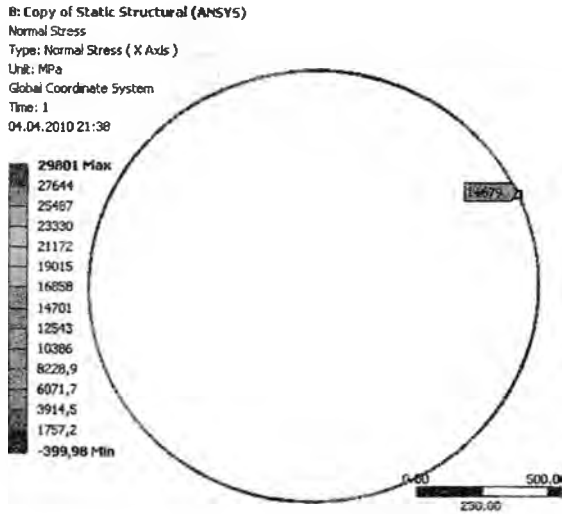
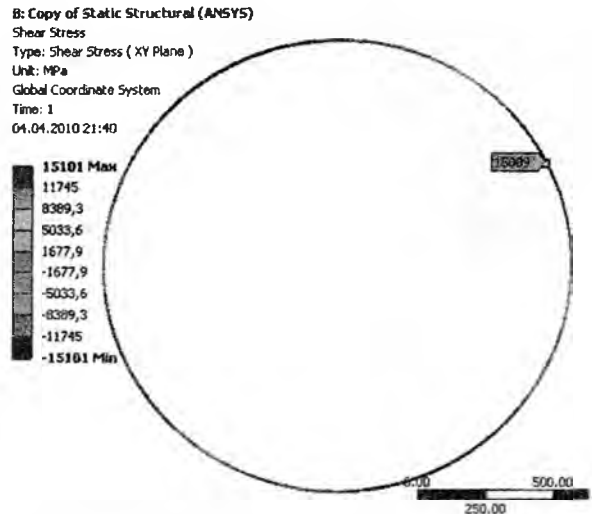


Рис. 4, а) распределение нормальных напряжений, МПа



б) распределение касательных напряжений, МПа

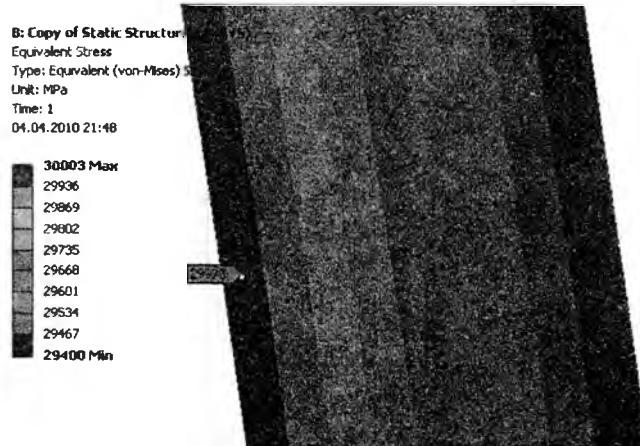


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, МПа

ЛИТЕРАТУРА

1. Колкунов Н.В. Основы расчета упругих оболочек. – М: Высш. школа, 1972. – 368 с.
2. Кравчук А.С., Смалюк А.Ф., Чигарев А.В. ANSYS для инженеров. – М.: Машиностроение, 2004. – 510с

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Работа любого ядерного реактора атомной электростанции (АЭС) связана с постоянным мониторингом (контролем) безопасности, которая основана на безопасной работе его отдельных элементов, одним из которых является тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ), имеющий, как правило, форму длинного цилиндра и находящийся в сложных условиях: постоянное механическое воздействие, влияние неравномерных полей высоких температур и радиационного облучения. Под работоспособностью ТВЭЛ АЭС понимается: сохранение целостности защитной оболочки на стадии облучения в тепловыделяющей сборке (ТВС) активной зоны и отсутствии ее значительных формоизменений, которые могут помешать нормальной эксплуатации ядерного реактора.

Оболочка тепловыделяющего элемента ядерного реактора представляет собой слой конструкционного материала, непосредственно прилегающего к ядерному топливу. Она предназначена для предохранения сердечника от воздействия химически активной среды и удержания продуктов деления, а также для исключения возможности вымывания топлива теплоносителем и для обеспечения механической прочности ТВЭЛов. Причем главным требованием, предъявляемым к оболочкам реакторов, является длительное сохранение герметичности. Отметим, что конструкция оболочки и ее толщина должны обеспечивать устойчивость под действием внешнего давления теплоносителя, прочность при термических и изгибных напряжениях, напряжений от давления газообразных продуктов деления и действия распухающего топливного сердечника, приходящего в контакт с оболочкой.

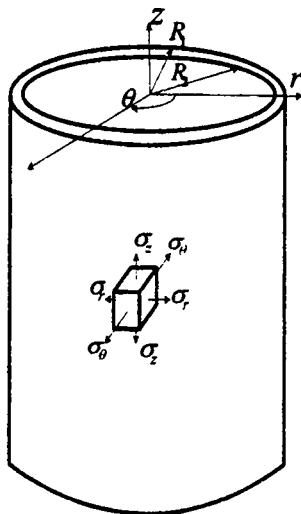


Рис. 1. Распределение главных напряжений в оболочке ТВЭЛ

Одним из важных следствий эксплуатации оболочки ТВЭЛ является возникновение внутренних напряжений (рис. 1). Появление внутренних напряжений связано с действием внешних статических, динамических и вибрационных нагрузок, со структурными изменениями под облучением, с распуханием топливного стержня и оболочки [1], с неодинаковым темпера-

турным уровнем отдельных участков оболочки, с температурными градиентами по сечению оболочки, а также с различием в величине коэффициентов термического расширения горючего и оболочки. Очевидно, что ввиду одновременного действия температуры и облучения происходят неравномерные объемные изменения материала конструкции (термическое расширение и радиационное распухание). Эти неравномерные объемные изменения являются источником дополнительных напряжений, которые наряду с напряжениями, вызванными механическим воздействием, оказывают влияние на поведение конструкции. Важно также знать, при каких флюенсах нейтронов распределения температуры это влияние существенно.

Отметим, что защитная оболочка твэла является наиболее ответственной конструкционной деталью активной зоны реактора, находящейся в очень сложных тепловых, механических, радиационных и химических условиях эксплуатации. В то же время, обладая, как правило, стенками относительно малой толщины, оболочки весьма чувствительны к внутренним и наружным дефектам [2]. Высокая теплопроводность материала оболочки необходима, прежде всего, для того, чтобы обеспечивать минимально возможный перегрев самой оболочки и горючего по сравнению с температурой теплоносителя. С теплопроводностью материала оболочки непосредственно связана величина термических напряжений в оболочке, которые могут достигать 100-250 МПа. Внутренние напряжения при неблагоприятных условиях могут привести к деформации (например, искривлению), растрескиванию конструкционных материалов, вызвать резкое повышение температуры и разрушение оболочек. Степень изменений, происходящих в оболочках под влиянием перечисленных факторов, зависит от интенсивности и длительности нейтронного облучения, температуры облучения и характера ее изменения в процессе работы реактора, от исходной структуры и свойств материалов оболочек, от свойств теплоносителя и его гидравлических характеристик.

Таким образом, в оболочках твэлов и процессе работы ядерного реактора могут возникать три типа напряжений [3]:

- вызываемые давлением теплоносителя и давлением газов в зазоре, а также давлением распухающего топлива, находящегося в контакте с оболочкой;
- обусловленные стационарными и нестационарными температурными полями;
- от неравномерного распухания материала оболочки.

В настоящее время изучение характера и степени возможных повреждений оболочек составляет одну из самых сложных проблем. Данные элементы имеют, как правило, цилиндрическую геометрию и подвержены значительным механическим, тепловым и радиационным нагрузкам. Отметим, что степень необратимых изменений, происходящих в оболочках под влиянием перечисленных факторов, зависит от интенсивности и длительности нейтронного облучения, температуры облучения и характера ее изменения в процессе работы реактора, от исходной структуры и свойств материалов оболочек, от свойств теплоносителя и его гидравлических характеристик. К настоящему времени выполнен значительный объем работ по этому направлению: Ю. И. Лихачев, В. Я. Пулко, В. В. Попов, А. А. Тутнов, В. В. Ткачев, И. С. Куликов, Geittus J. H., Lassmann K., Nagato K., Takikawa N., Rashid J. R. И др. Однако все разработанные модели для определения НДС защитных оболочек базируются на тех или иных допущениях, и носят достаточно приближенный характер. Поэтому цель, преследуемая авторами, заключается в том, чтобы на основе принципов и методов механики деформированного твердого тела представить теорию напряжённо-деформированного состояния для тонкостенной цилиндрической оболочки при механических нагрузках с учётом внутрореакторных условий АЭС. В рассматриваемой постановке задачи присутствуют радиационное распухание оболочки. В общем случае оно представляет собой изменение объема оболочки под действием потока быстрых нейтронов, причем значительно меняет картину распределения деформаций и напряжений. Термическое воздействие, в данной задаче, представляет собой неравномерный стационарный нагрев тонкостенной цилиндрической оболочки.

Для компонент деформации и изменений кривизны срединной поверхности оболочки, и перемещений ее срединного слоя имеют место следующие приближенные соотношения:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial z}; \quad \varepsilon_{22} = \frac{1}{R} \frac{u_2}{\partial \beta} + \frac{\omega}{R}; \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial u_1}{\partial \beta} + \frac{\partial u_2}{\partial z} \right); \quad (1)$$

$$\chi_{11} = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}; \quad \chi_2 = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{\partial \omega}{\partial \beta} - u_2 \right); \quad \chi_{12} = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \omega}{\partial \beta} - u_2 \right). \quad (2)$$

Для цилиндрической оболочки, находящейся во внутриреакторных условиях, компоненты деформаций и напряжений в общем виде связаны между собой соотношениями:

$$\varepsilon^{(z)}_{11} = \frac{\sigma_{11} - \nu \sigma_{22}}{E} + \varepsilon_{11}^T + \frac{1}{3} \varepsilon_{11}^S; \quad \varepsilon^{(z)}_{22} = \frac{\sigma_{22} - \nu \sigma_{11}}{E} + \varepsilon_{22}^T + \frac{1}{3} \varepsilon_{22}^S. \quad (3)$$

$$\sigma_{11} = \frac{N_{11}}{h} + \frac{12M_{11}z}{h^3}; \quad \sigma_{22} = \frac{N_{22}}{h} + \frac{12M_{22}z}{h^3}. \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{11} &= D_N (\varepsilon_{11} + \nu \varepsilon_{22} - (1 + \nu)(\varepsilon_{11}^T + \varepsilon_{11}^S)) \\ N_{22} &= D_N (\nu \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} - (1 + \nu)(\varepsilon_{22}^T + \varepsilon_{22}^S)) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{11} &= D_M (\chi_{11} + \nu \chi_{22} - (1 + \nu)(\chi_{11}^T + \chi_{11}^S)) \\ M_{22} &= D_M (\nu \chi_{11} + \chi_{22} - (1 + \nu)(\chi_{22}^T + \chi_{22}^S)) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Рассмотрим оболочку твэла под воздействием поля высоких температур и нейтронного потока. В качестве конкретного примера будем рассматривать напряженно-деформированное состояние оболочки твэла, изготовленной из стали ОХ16Н15М3Б (316L – зарубежный аналог).

Таким образом, имеем, что оболочка внутренним радиусом $R_1 = 0,003$ м и внешним радиусом $R_2 = 0,0033$ м находится под действием: внутренних $P_A = 7.5$ МПа и внешних $P_1 = 0.1$ МПа нагрузок в условиях объемных термических $T(r)$ и радиационных $S(T(r), \phi)$ деформаций со следующими параметрами $E = 2.10^5$ МПа, $T(R_1) = 300(573)^\circ\text{C(K)}$, $T(R_2) = 600(873)^\circ\text{C(K)}$, $\alpha = 18.3 \cdot 10^6$ град $^{-1}$.

Где $S(T(r), \phi)$ – функция радиационного распухания, зависящая от температуры, времени и заданной плотности нейтронного потока, имеет вид [4]:

$$S(T(r), \phi t) = 4.9 \cdot 10^{-51} (\phi t)^{1.71} \cdot 10^{\frac{15490}{T(r)} + \frac{5.98 \cdot 10^6}{(T(r))^2}} \quad (7)$$

При рассмотрении задачи НДС оболочки сделаем некоторые допущения:

- перемещения и деформации оболочки малы (значительно меньше единицы);
- радиальная, тангенциальная и продольные оси оболочки (Z, θ, X) являются главными;
- температура оболочки считается заданной – $T(Z, \theta, X)$.

Рассмотрим НДС тонкостенной цилиндрической оболочки (рис. 2), находящейся под действием физических нагрузок, поля высоких температур и нейтронного облучения.

Из симметрии можно заключить, что сдвигающие силы $N_{x\varphi} = N_{\varphi x}$ обращаются в данном случае в нуль. Точно также, следуя из симметрии, обнаруживается, что поперечные силы Q_φ обращаются в нуль. Также на основании симметрии крутящие моменты $M_{x\varphi} = M_{\varphi x}$ обращаются в нуль. Спроектируем силы на оси x и z и найдём моменты сил относительно оси y . Положим, что внешние силы действуют только лишь по нормали к поверхности оболочки.

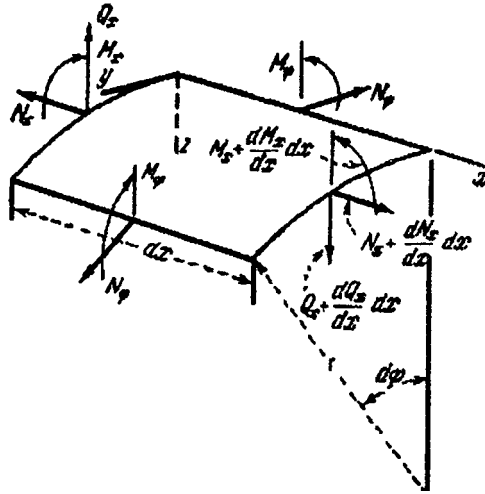


Рис. 2. Проекция сил и моментов сил в тонкостенной цилиндрической оболочке для вывода уравнения равновесия

С учетом вышесказанного, система уравнений равновесия принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dN_x}{dx} \cdot r \cdot dx \cdot d\varphi = 0, \\ \frac{dQ_x}{dx} \cdot r \cdot dx \cdot d\varphi + N_\varphi \cdot dx \cdot d\varphi + q \cdot r \cdot dx \cdot d\varphi = 0, \\ \frac{dM_x}{dx} \cdot r \cdot dx \cdot d\varphi - Q_x \cdot r \cdot dx \cdot d\varphi = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Откуда получаем исходное уравнение равновесия, записанное через приложенные нагрузки и образуемые моменты:

$$\begin{cases} \frac{dN_x}{dx} = 0, \\ \frac{dQ_x}{dx} + \frac{N_\varphi}{r} + q = 0, \\ \frac{dM_x}{dx} - Q_x = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Из первого уравнения системы (9) следует, что $N_x = const = 0$. Влиянием сил N_x пренебрегаем. Тогда уравнение равновесия представится в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dQ_x}{dx} + \frac{N_\varphi}{r} = -q, \\ \frac{dM_x}{dx} - Q_x = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Продифференцируем второе уравнение системы уравнений (10) по x

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} = \frac{dQ_x}{dx} \quad (11)$$

Подставим уравнение (11) в первое уравнение системы (10)

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + \frac{N_\varphi}{r} = -q \quad (12)$$

Запишем величины в (12) через индексы

$$\frac{d^2 M_{11}}{dx^2} + \frac{N_{22}}{r} = -q \quad (13)$$

Запишем геометрические уравнения (соотношения Коши). Из симметрии следует, что v – смещение в окружном направлении обращается в ноль, поэтому в расчетах учитываются только u и w для связи тензора деформаций и вектора перемещений.

$$\varepsilon_{11} = \frac{du}{dx}; \quad \varepsilon_{22} = \frac{w}{r}; \quad \chi_{11} = -\frac{d^2 w}{dx^2}. \quad (14)$$

Выведем физические уравнения. Учитывая, что нормальные напряжения на площадках, параллельных срединной поверхности оболочки пренебрежимо малы по сравнению с остальными напряжениями и при расчёте не учитываются, запишем систему физических уравнений (3) в виде:

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11} - \nu \sigma_{22}}{E} + B(r); \\ \varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22} - \nu \sigma_{11}}{E} + B(r); \end{cases} \quad (15)$$

где функция $B(r)$:

$$B(r) = \alpha \cdot T(r) + \frac{1}{3} \cdot S[T(r), \phi t] \quad (16)$$

Выразим из системы уравнений (15) σ_{11} и σ_{22} :

$$\begin{cases} \sigma_{11} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{11(z)} + \nu \cdot \varepsilon_{22(z)} - B(r) \cdot (1+\nu)]; \\ \sigma_{22} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{22(z)} + \nu \cdot \varepsilon_{11(z)} - B(r) \cdot (1+\nu)]; \end{cases} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{11(z)} = \varepsilon_{11} + z \cdot \chi_{11}; \quad \varepsilon_{22(z)} = \varepsilon_{22} + z \cdot \chi_{22}. \quad (18)$$

Выражения (17) устанавливают связь между деформациями в произвольной точке оболочки и перемещениями соответствующей точки срединной поверхности.

Воспользуемся формулами для определения нормальных сил и изгибающего момента

$$N_{11} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{11} dz; \quad N_{22} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{22} dz; \quad M_{11} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{11} \cdot z \cdot dz. \quad (19)$$

Применим формулы (19) к системе (17), учитывая (18) и проведя интегрирование, получим новую систему физических уравнений:

$$\begin{cases} N_{11} = \frac{E \cdot h}{1 - \nu^2} \cdot [\varepsilon_{11} + \nu \cdot \varepsilon_{22} - B(r) \cdot (1 + \nu)] \\ N_{22} = \frac{E \cdot h}{1 - \nu^2} \cdot [\varepsilon_{22} + \nu \cdot \varepsilon_{11} - B(r) \cdot (1 + \nu)] \\ M_{11} = D \cdot [\chi_{11} + \nu \cdot \chi_{22}] \end{cases} \quad (20)$$

где $D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$ – цилиндрическая жёсткость оболочки.

Подставим в систему уравнений (20) соотношения Коши (14) и, учитывая, что при рассмотрении системы уравнений равновесия было принято $N_{11} = 0$, будем иметь:

$$\frac{du}{dx} = -\nu \cdot \frac{w}{r} + B(r) \cdot (1 + \nu). \quad (21)$$

Подставляя (21) во второе уравнение системы (17) получаем N_{22} . В итоге – получена следующая система уравнений, записанная через усилия:

$$\begin{cases} N_{22} = E \cdot h \cdot \left[\frac{w}{r} - B(r) - \varepsilon_{22}^c \right], \\ M_{11} = -D \cdot \frac{d^2 w}{dx^2}. \end{cases} \quad (22)$$

Подставляя уравнения (22) в (13), находим:

$$D \cdot \frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{E \cdot h}{r^2} \cdot w = q - \frac{E \cdot h}{r} \cdot [B(r) + \varepsilon_{22}^c] \quad (23)$$

Таким образом, получили уравнение равновесия для цилиндрической оболочки в условиях нейтронного облучения и термического нагрева, выраженное через ее прогиб. Основные обозначения для тензора деформаций следующие: ε_{ij}^T – объёмные термические деформации; ε_{ij}^S – объёмные деформации радиационного распухания. Отметим, что большинство физических процессов в активной зоне АЭС описывается нелинейными уравнениями. Аналитическое решение подобных уравнений известно лишь для единичных случаев. Поэтому решение таких задач сводится к использованию численных методов. Наиболее простым в употреблении и достаточно точным численным методом решения дифференциальных уравнений является метод Рунге-Кутты. Для решения дифференциального уравнения методом Рунге-Кутты, задаем гра-

нические условия: один торец оболочки жёстко закреплён, второй без опоры. Эти граничные условия представляются в следующей математической интерпретации:

$$\begin{aligned} \omega &= 0 \text{ при } x = 0; \\ \frac{d\omega}{dx} &= 0 \text{ при } x = 0; \\ M_x &= -D \frac{d^2\omega}{dx^2} = 0 \text{ при } x = L; \\ Q_x &= -D \frac{d^3\omega}{dx^3} = 0 \text{ при } x = L. \end{aligned} \quad (24)$$

Записанное дифференциальное уравнение (23) с граничными условиями (24) представляет собой краевую задачу. Поэтому данное дифференциальное уравнение решаем методами позволяющими решить краевую задачу. Зная алгоритм метода пристрелки и алгоритм реализации метода Рунге-Кутты, запрограммируем решение задачи в пакете Mathematica 5.0, результаты которой представлены на рис. 3-13. Изначально была решена упругая задача, результаты которой представлены на рис. 3-5.

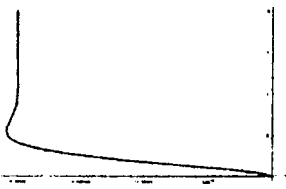


Рис. 3. Кривая зависимости прогиба от длины оболочки

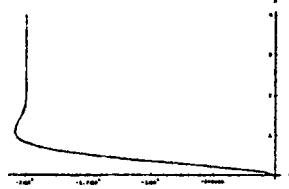


Рис. 4. Кривая зависимости напряжений от длины оболочки

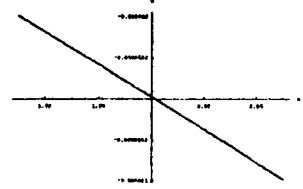


Рис. 5. Кривая зависимости перемещений от радиуса оболочки

Результаты, полученные по средствам компьютерной программы инженерных расчетов Mathematica 5.0 для задачи с учётом наружного давления, температурного расширения и радиационного распухания для различных временных интервалов нагружения представлены на рис. 6-15.

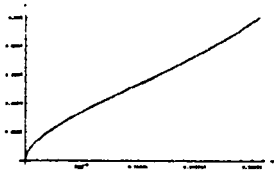


Рис. 6. Кривая зависимости прогиба от длины оболочки в момент времени $t=0$ ч.

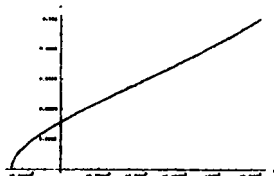


Рис. 7. Кривая зависимости напряжений от длины в момент времени $t=0$ ч.

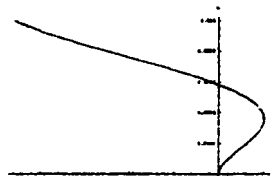


Рис. 8. Кривая зависимости прогиба от длины оболочки в момент времени $t=400$ ч.

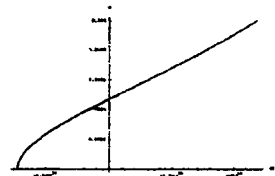


Рис. 9. Кривая зависимости напряжений от длины в момент времени $t=400$ часов

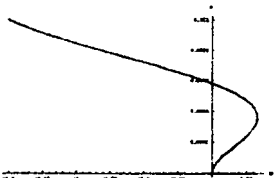


Рис. 10. Кривая зависимости прогиба от длины оболочки в момент времени $t=800$ ч.

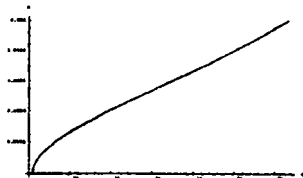


Рис. 11. Кривая зависимости напряжений от длины в момент времени $t=800$ ч.

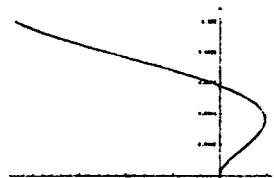


Рис. 12. Кривая зависимости прогиба от длины оболочки в момент времени $t=1000$ ч.

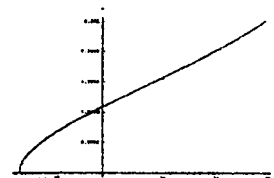


Рис. 13. Кривая зависимости напряжений от длины в момент времени $t=1000$ ч.

Из полученных графических зависимостей можно заключить, что с увеличением срока эксплуатации оболочки будут увеличиваться и значения перемещений, на что существенно влияет фактор объемного радиационного распухания, в запись уравнения которого входит параметр времени, связанный прямо пропорциональной зависимостью со значением радиационных деформаций $S(T(r,Z), \phi t)$.

Для проверки правильности составленного алгоритма решения дифференциального уравнения, сравним результаты, полученные для упругой задачи (действует только наружное давление), при ее реализации в пакете Mathematica 5.0 с результатами аналогичной задачи, смоделированной в инженерном программном комплексе ANSYS Workbench. Значения прогибов по длине оболочки, полученные в пакете Mathematica (рис. 4) совпадают с прогибами, полученными средствами CAE в пакете ANSYS (рис. 14), что, в свою очередь, говорит о правильности численного решения.

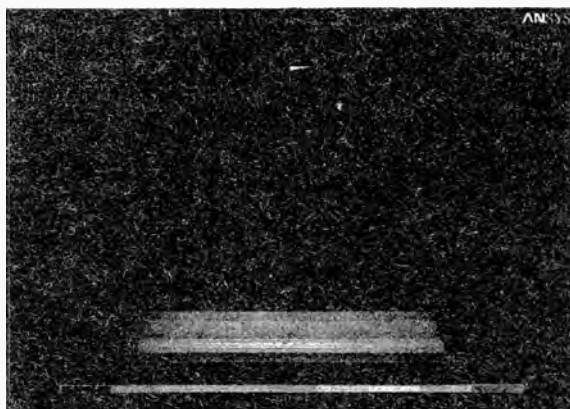


Рис. 14. Распределение прогибов в оболочке

В конечном результате исследований можно заключить следующее – получены разрешающие дифференциальные уравнения, разработана математическая модель и алгоритм нахождения основных характеристик НДС оболочки, запрограммирована компьютерная программа нахождения решения поставленной терморadiационной квазистатической задачи, построены графические зависимости прогибов и напряжений от длины оболочки. Проведен сравнительный анализ результатов механической задачи с решением в программной среде МКЭ ANSYS, показавший идентичность значений, что, в свою очередь, говорит о правильности составленного дифференциального уравнения и выборе численного метода решения рассматриваемой задачи исследования НДС. Заметим, что данная работа, как и все работы по аналогичной тематике, заслуживают высокого внимания по причине, того, что в настоящее время в Республике Беларусь развивается собственная ядерная программа, первыми шагами которой является воздвижение атомной электростанции. Результаты предлагаемого исследования имеют как теоретическую, так и практическую значимость, позволяя корректно описывать напряжённо-деформированное состояние важных элементов конструкций энергоблоков АЭС, в том числе в ряде аварийных ситуаций. А разработанная теория может стать основой для решения конкретных прикладных задач в области атомного машиностроения.

Благодарности

- Авторы благодарят д.ф.-м.н. И.С.Куликова и д.т.н. Б.Е.Тверковкина за плодотворные обсуждения и дискуссии в ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси.

• Работа выполнена при поддержке гранта БФФИ № Т09М-090 (№ госрегистрации: 20091888). Тема: «Моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек при неравномерном нагреве и нейтронном облучении».

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов В.П., Драгунов Ю.Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИздАТ, 2002. – 480 с. 2. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248с. 3. Займовский А.С. Тепловыделяющие элементы атомного реактора/ А.С. Займовский, В.В. Калашников, И.С. Головнин. – М.: Атомиздат, 1979. – 517с. 4. Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С.Куликов, Б.Е. Тверковкин.- Мн.: Наука и техника, 1984. – 104с.

УДК 539.3

Язневич А.М.

ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИИ НА ПРОЧНОСТЬ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Методы расчета строительных конструкций позволяют учесть все возможные неблагоприятные нагрузки. Случаются ошибки при проектировании и изготовлении конструкций, а также при нарушении расчетного режима эксплуатации. Одной из опасных ошибок является недоучет влияния коррозии на арматуру.

Коррозией металлов называется химическое разрушение, обусловленное взаимодействием металлических материалов с окружающей средой. В процессе коррозии протекают реакции окисления-восстановления, в которых окислителем является среда, соприкасающаяся с металлами. При окислении происходит переход атомов металла из нейтрального состояния в положительно заряженные ионы, входящие в состав продуктов коррозии. Сталь не будет подвержена коррозии если электролит имеет достаточно высокий рН, что вызывает пассивацию поверхности стали. Состояние пассивности сохраняется в случае, если имеется динамическое равновесие между факторами, создающими защитную пленку и факторами, нарушающими ее сплошность (водородными и галогидными ионами, катодной поляризацией). При понижении рН электролита пассивное состояние нарушается – происходит процесс коррозии.

В плотном неповрежденном бетоне стальная арматура может находиться в сохранности на протяжении длительного срока эксплуатации конструкций при любых условиях влажности окружающей среды. Коррозия стали в бетоне возникает в результате нарушения ее пассивности, которое может быть вызвано основными факторами: действием хлорид-ионов, которые проникают к поверхности арматуры через трещины в бетоне, карбонизацией, трещинами. Хлориды снижают рН электролита и вызывают коррозию арматуры. Хлориды могут быть внесены в бетон добавками или мигрировать извне, с течением времени. Карбонизация защитного слоя бетона тоже уменьшает рН электролита, что вызывает коррозию арматуры. Чем больше пористость бетона, тем выше скорость карбонизации. Трещины в бетоне, облегчают доступ внешней агрессивной среды к поверхности арматуры, что тоже приводит к коррозии арматуры.

В настоящее время при производстве стержневой арматуры для железобетонных конструкций прослеживается устойчивая тенденция к снижению расхода дорогостоящих легирующих элементов при одновременном повышении прочности проката. Обеспечение высоких прочностных свойств достигается быстрым охлаждением арматуры в потоке сортовых станов на специальной установке термического упрочнения. Установлено, что в результате термического упрочнения по режиму прерывистой закалки арматуры ОАО «ЗСМК» в сечении стержней формируется градиентная структура в виде пяти соосно расположенных структурных слоев [1]. Выделенные при исследовании слои названы поверхностным, переходным и осевым (рис.1).

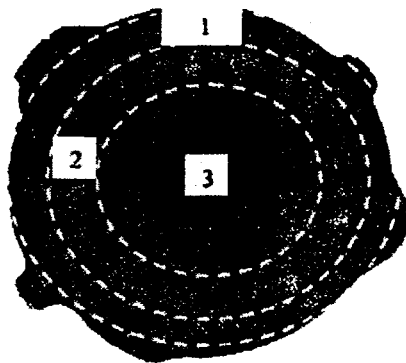


Рис. 1. Зонное строение арматурного стержня (металлография травленого шлифа):
1 – поверхностный; 2 – переходный; 3 – осевой слою.

Микроструктура слоев в направлении от поверхности к осевой зоне изменяется. Исследования показали, что строение арматурных стержней зависит от диаметра стержня [1]. С увеличением диаметра растет толщина упрочненных поверхностных слоев при сохранении структурных составов.

Таблица 1 – Толщины структурных слоев арматуры из стали СтЗпс

Профиль	Средняя глубина слоев, мм			
	поверхностный	переходные		
		1-й	2-й	3-й
№12	0,9	0,6	0,7	1,3
№16	1,3	0,8	1,0	1,4
№20	1,5	0,8	1,2	1,4
№22	1,8	1,1	1,2	1,4

Наличие в поперечном сечении арматурных стержней диаметром структурной неоднородности подтверждают и исследования микротвердости. Максимальную твердость имеет приповерхностная часть арматурного стержня, а минимальную - центральный участок [1,2].

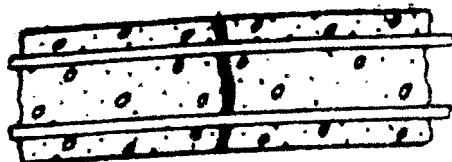
В процессе изготовления железобетонных конструкций арматура подвергается воздействиям сварки, резки, деформирования, и при работе арматуры под нагрузкой происходит изменение ее структурного состояния. Длительные сроки эксплуатации железобетонных конструкций вследствие этого приводят к ухудшению механических характеристик арматуры.

Бетонные и железобетонные конструкции не являются монолитными в физическом смысле. Затвердевший бетон состоит из мелких трещин, которые появляются вследствие внутренних напряжений в процессе структурообразования еще до приложения внешней нагрузки. Наличие микротрещин в бетоне наряду с полем внутренних напряжений является причиной низкой прочности бетона по сравнению с теоретически возможной.

Образование микротрещин начинается при твердении бетона. В дальнейшем на поле напряжений структурообразования накладываются напряжения от температурных и влажностных градиентов, а также от внешних сил, что в свою очередь способствует появлению микротрещин. Микротрещины ведут к образованию макротрещины, называемой в дальнейшем просто трещиной. Трещины возникают из-за деформации, имеющей определенное направление, вследствие чего разрывы между структурными микротрещинами, соединяясь в сплошную цепочку, образуют вполне ориентированную поверхность [2].

Характеристиками трещин могут служить такие показатели, как размеры - длина, глубина, ширина раскрытия, форма продольного и поперечного сечения:

Сквозная с параллельными стенками



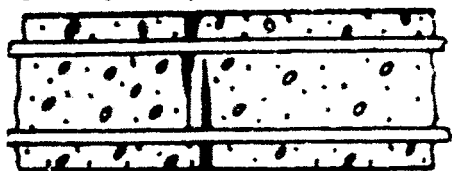
Центрально растянутые стержни ферм

Сквозная клиновидная



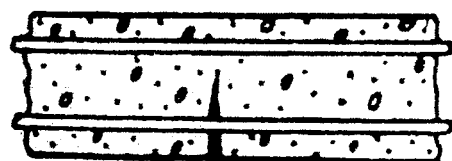
Внецентренно растянутые элементы конструкции

Несквозная внахлестку



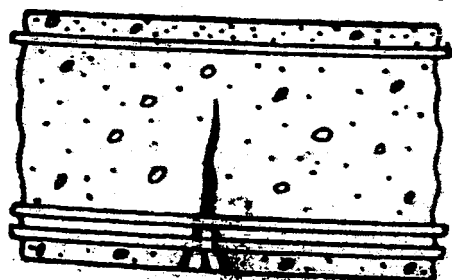
Центрально и внецентренно растянутые элементы конструкции

Несквозная клиновидная



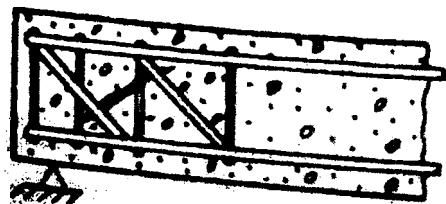
Внецентренно сжатые элементы конструкций

Веретенообразная



Изгибаемые при большой высоте сечения элементы конструкций

Замкнутая косая



Изгибаемые элементы конструкции

Причины образования трещин весьма разнообразны и обусловлены в основном небольшой растяжимостью бетона. Технологические трещины обычно образуются при неблагоприятном режиме тепловлажностной обработки железобетонных изделий, когда в материале возникают значительные напряжения вследствие перепада температур по толщине. На образование и развитие трещин влияют также усадочные деформации бетона. Трещины могут возникнуть во время транспортирования и монтажа конструкций, при их складировании и перевозке. В центрально растянутых элементах и в растянутой зоне изгибаемых железобетонных элементов

трещины появляются под действием постоянной и временной нагрузок в период эксплуатации сооружения.

Трещины в бетоне уменьшают жесткость конструкций, увеличивают их проницаемость, понижают морозостойкость, а также способствуют появлению и развитию коррозии арматуры.

Трещины в бетоне облегчают поступление влаги, воздуха и агрессивных веществ из окружающей среды к поверхности стали, вследствие чего ее пассивное состояние на отдельных участках нарушается. В местах образования трещин усиливается, воспринимаемое бетоном, передается на арматуру, и удлинение ее в этих местах заметно возрастает, что влечет за собой нарушение сцепления между арматурой и бетоном на некоторой длине. В связи с этим процесс коррозии арматуры начинается не только в трещинах, но и под бетоном [4].

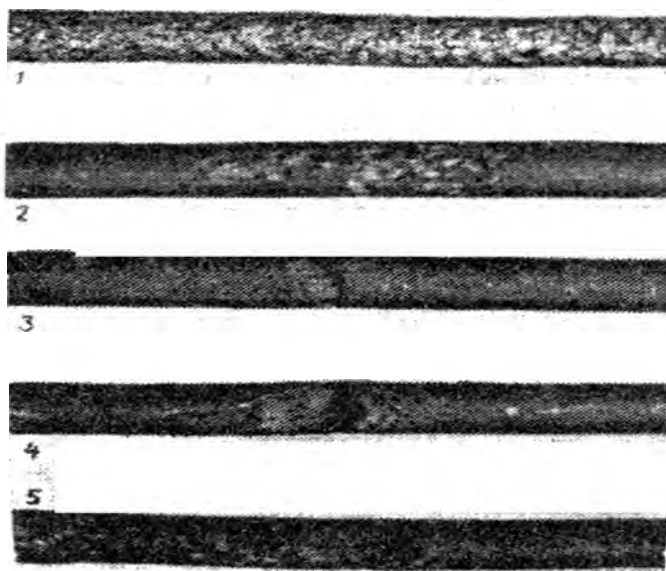


Рис. 2. Коррозия арматуры в зоне трещин

В зависимости от характера агрессивной среды и особенностей воздействия ее на металлы, разрушение может быть равномерным или неравномерным (локальным).

Равномерная коррозия распространяется вглубь одинаково по всей поверхности, неравномерная – сосредотачивается на определенных участках, в то время как остальная поверхность остается почти не разрушенной.

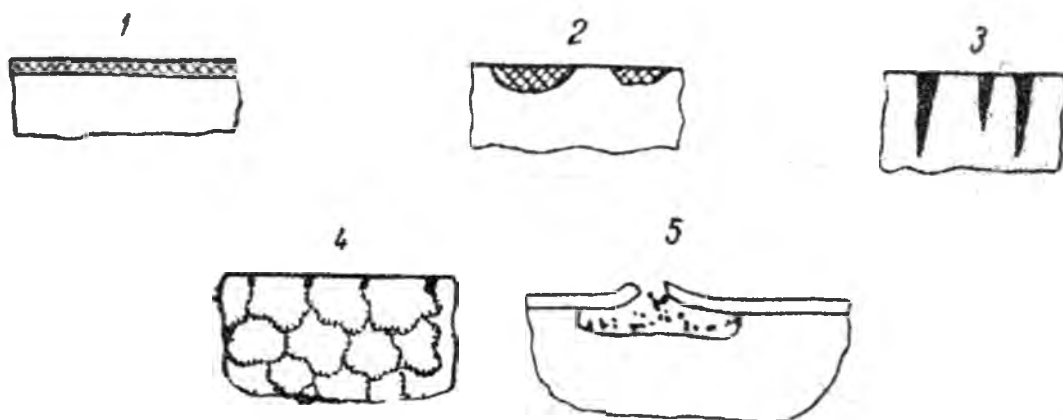


Рис. 3. Виды коррозионного разрушения: 1 – равномерная коррозия; 2 – коррозия пятнами; 3 – коррозия точечная; 4 – коррозия интеркристаллитная; 5 – подповерхностная коррозия

Наиболее распространенными видами неравномерной коррозии, приносящими основной ущерб, являются контактная, щелевая, питтинговая и межкристаллитная.

Факторы, обуславливающие локальную коррозию, можно разделить на группы: 1. Структурные особенности металла. 2. Условия эксплуатации конструкций. 3. Местные нарушения свойств защитных покрытий. 4. Конструктивные особенности изделий.

Каждый фактор в отдельности, а иногда в совокупности с другими может вызвать локальную коррозию.

Нарушение по каким-либо причинам пассивного состояния на отдельном участке поверхности приводит к тому, что анодные реакции концентрируются на этом месте и протекают с относительно большой скоростью. Характерным локальным процессом такого вида является питтинговая коррозия.

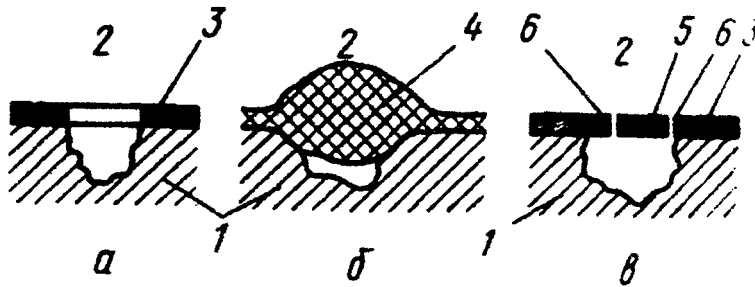


Рис. 4. Характерные виды питтингов: а - открытый, с защитным слоем на окружающей поверхности; б - закрытый, без окружающего защитного слоя; в - закрытый, с окружающим защитным слоем; 1 - металл; 2 - раствор; 3 - защитный слой; 4 - пористые продукты коррозии и отложения; 5 - крышка над питтингом; 6 - отверстия в крышке

Форма питтингов изменяется от неправильной до почти правильной геометрической (чаще всего полусферической) формы [3].

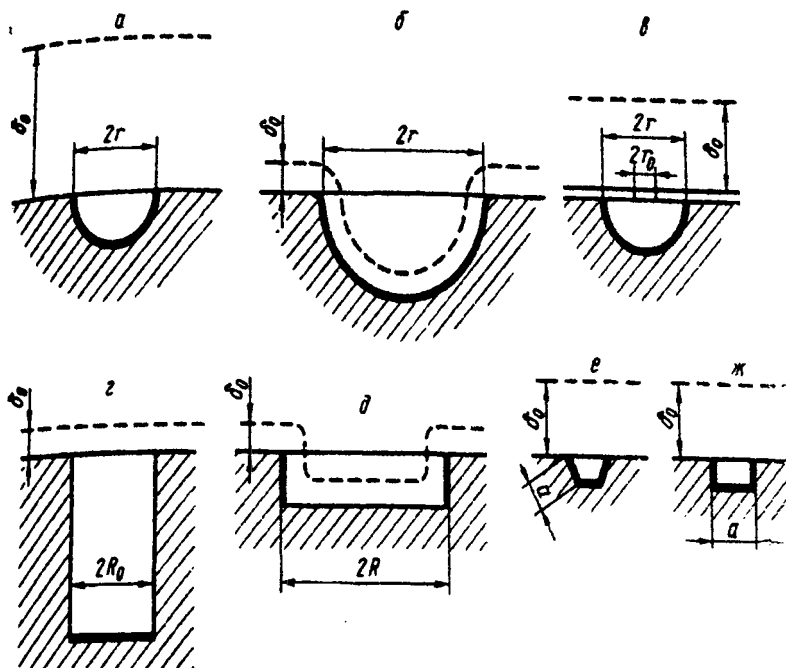


Рис. 5. Питтинги правильной геометрической формы и их параметры (r_0 - радиус центрального отверстия в крышке закрытого питтинга; h_0 - толщина диффузионного слоя у электрода). Жирной линией показана растворяющаяся поверхность в питтинге: а - в - полусферические (а - малый открытый; б - крупный открытый; в - закрытый); г, д - цилиндрические (г - с пассивными стенками, д - с пассивным дном); е, ж - полиэдрические (е - усеченная правильная пирамида; ж - многогранник)

Наличие механических растягивающих напряжений ведет к еще более локализованной коррозии - коррозионной усталости и коррозионному растрескиванию.

Выводы:

1. Прокат арматурный производства ОАО «ЗСМК» имеет слоистое строение с соосно расположенными слоями, имеющими различные механические свойства. Арматурный стержень можно рассматривать как неоднородный стержень со слоистой структурой.

2. При расчетах следует учитывать, что прочность целого стержня зависит от прочностных и деформационных характеристик отдельных слоев. Поскольку более прочные слои арматурных стержней располагаются в приповерхностной зоне, то при проектировании изделий с их использованием необходимо учитывать повышенную чувствительность таких стержней к воздействию коррозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юрьев А.Б. Структура термически упрочненной стержневой арматуры / А.Б. Юрьев, В.Я. Чинокалов, О.Ю. Ефимов, Н.В. Мыскова, О.С. Прокофьева // *Технология металлов.*-2005, №9.-с.5-7.
2. Чинокалов В.Я., Юрьев А.Б., Ефимов О.Ю., Михаленко И.А., Мыскова Н.В. Прочность структурных слоев в сечении термически упрочненной арматуры// *Технология металлов.*-2005, №10.-с.15-18.
3. Сокол И.Я. Структура и коррозия металлов и сплавов / И.Я Сокол, Е.А. Ульянин, Э.Г. Фельдгандлер и др.// -М.: Металлургия, 1989. -400с.
4. Москвин В.М. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры / В.М. Москвин, С.Н. Алексеев, Г.П. Вербецкий, В.И. Новгородский // -М.: Стройиздат, 1971.-142с.
5. Фокин М.Н. Методы коррозионных испытаний металлов / М.Н. Фокин, К.А. Жигалова // -М.: Металлургия, 1986. – 78с.
6. Томашов Н.Д. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы / Н.Д. Томашов, Г.П. Чернова // -М.: Металлургия, 1986. – 359с.
7. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов / И.Л. Розенфельд // -М.: Металлургия, 1969. – 448с.

УДК 621.7

Якубовский А. Ч., Якубовский Ч.А., Галуза И.М., Галуза Е.М.

АРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НАВИВАЕМОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Высокая производительность современных машин и установок часто напрямую связана с возникновением больших динамических нагрузок, вызываемых собственными или вынужденными колебаниями систем, что может создавать угрозу безопасности или выхода из строя [1]. По этой причине в конструкциях рабочих механизмов или опор используют демпфирующие устройства различного исполнения и принципа действия [2]. Установлена возможность и целесообразность использования пористых материалов на основе металлических волокон (ПВМ), проволочных спиралей (МР) и сеток (ПСМ) в качестве элементов для некоторых конструкций демпфирующих устройств [3]. Помимо этих хорошо известных материалов создан новый пористый материал на основе навиваемой проволоки (ПМНП) [4], изготавливаемый, как правило, в виде пористой трубы. Он характеризуется анизотропией механических свойств и имеет максимальную прочность на растяжение витков проволоки в направлении их укладки (в тангенциальном направлении под углом к образующей трубы) [5]. Направление же монтажных нагрузок (осевое) или эксплуатационных нагрузок (осевое или радиальное) с этим направлением

ем не совпадают [6, 7]. Компенсировать анизотропию, а также придать материалу некоторые особые свойства, можно, например, армированием материала.

Армирование может быть осуществлено на стадии формирования проволочной заготовки (рис. 1) [4] с расположением арматуры как на внутренней или наружной поверхности материала, так и внутри него. Количество арматуры и ее расположение определяются требованиями, предъявляемыми к изделию, в соответствии с предполагаемыми условиями эксплуатации изделия. При этом подобное усиление, в силу малости занимаемого арматурой относительного объема материала, практически никак не сказывается на пропускной способности изделия, если таковую необходимо обеспечить.

Возможны несколько видов армирования.

1. Армирование проволокой большего диаметра (рис. 1) — производится следующими способами:



Рис. 1. Армирование ПМНП проволокой большего диаметра различными способами: продольное (а), по спирали (б), встречными спиралями (в), комбинированное (г).

а) продольное (рис. 1,а) — арматура в виде проволок, расположенных вдоль образующей цилиндра, позволяющая существенно увеличить прочность пористой трубы в осевом направлении, что важно при ее монтаже с поджимом по торцам, но незначительно повышающая сопротивление трубы радиальному внутреннему или наружному давлению;

б) по спирали (рис. 1,б) — арматура в виде однонаправленных проволочных спиралей, приводящая в большей степени к росту сопротивления пористой трубы радиальному давлению, но не повышающая ее осевую прочность, так как при зажиме по торцам в теле трубы возникают дополнительные усилия скручивания;

в) встречными спиралями (рис. 1,в) — арматура в виде разнонаправленных проволочных спиралей, способствующая усилению материала в радиальном и в осевом направлении;

г) комбинированное армирование (рис. 1,г), когда в качестве арматуры используется и прямая проволока, и проволочная спираль, — во многих случаях может оказаться наиболее эффективным способом среди перечисленных; так, в сравнении с вариантом на рис. 1,а при степени армирования в 5% (определялась как отношение площади проекции проволоки всех армирующих элементов на внутреннюю поверхность пористой трубы к площади внутренней поверхности трубы) сопротивление ПМНП внутреннему давлению возросло в 1,7 раза, а сопротивление осевому нагружению возросло в 1,6 раза.

2. Армирование спиральной пружинкой (рис. 2,а) — повышает прочность и жесткость материала в радиальном направлении и придает ему гибкость, что может представлять весьма практический интерес.

3. Армирование тканой сеткой (рис. 2,б) — обеспечивает высокую прочность и жесткость ПМНП во всех направлениях.



Рис. 2. Армирование ПМНП спиральной пружиной (а) и тканой сеткой (б).

Для экспериментального исследования связи разрушающего давления со степенью уплотнения при изготовлении ПМНП в зависимости от вида армирования в качестве опытных образцов были изготовлены армированные различными способами пористые трубы внутренним диаметром 50 мм с толщиной стенки 2 мм из проволоки Х20Н80 диаметром 0,15 мм. Установлено (рис. 3), что с увеличением степени уплотнения ПМНП увеличивается их прочность, и необходимое для разрушения материала внутреннее давление растет независи-

симо от вида армирования. При этом выявлена наиболее высокая прочность материалов, армированных спиральными пружинами. Однако в данной работе не были в полной мере исследованы материалы с использованием в качестве арматуры тканой сетки.

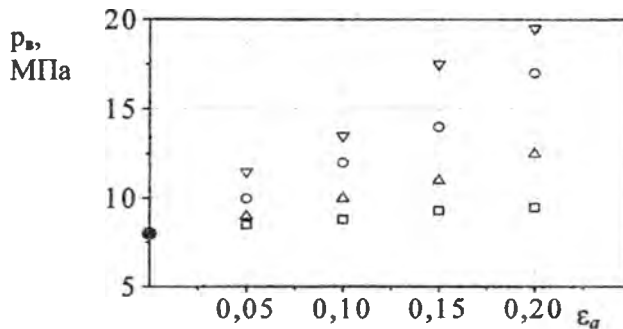


Рис. 3. Связь разрушающего внутреннего давления со степенью уплотнения ПМНП в зависимости от вида армирования:

□ — армирование по рис. 1,а; Δ — армирование по рис. 1,б;
○ — армирование по рис. 1,в;
▽ — армирование спиральной пружиной

Изделия из армированных ПМНП способны обладать широким диапазоном специальных свойств, связанных с сопротивлением к вибрациям и значительным динамическим нагрузкам. Это позволяет расширить область применения ПМНП в технике до их использования в качестве всевозможных демпфирующих элементов силовых установок различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левитский Н.И. Колебания в механизмах. — М.: Наука, 1988. — 336 с. 2. Фролов К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиностроения. — М.: Машиностроение, 1984. — 224 с. 3. Белов С.В. Пористые проницаемые материалы: Справочник. — М.: Металлургия, 1987. — 335 с. 4. Якубовский А.Ч., Петюшик Е.Е. Технология получения пористых проволоочных изделий // Материалы международного научного симпозиума. — Зелена Гура (Польша), 2001. — Т. Механика. — С. 247 – 252. 5. Петюшик Е.Е., Якубовский А.Ч. Оценка прочности проволоочной пористой трубы // Машиностроение. — Минск, 2002. — Вып. 18. — С. 456 – 460. 6. Якубовский А.Ч., Якубовский Ч.А. Расчет монтажных нагрузок в пористом проволоочном изделии // Теоретическая и прикладная механика. — Минск, 2005. — Вып. 18. — С. 118 – 121. 7. Якубовский А.Ч., Петюшик Е.Е., Галуза И.М. К вопросу о механических свойствах проницаемых материалов на основе проволоки // Машиностроение. — Минск, 2009. — Вып. 24. — Том 1. — С. 172 – 175.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОЖИДКОСТНОГО ЭЛЕМЕНТА БИОСЕНСОРА
В ПАКЕТЕ ANSYS CFX**

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Одним из бурно развивающихся направлений микро- и нанотехники является разработка микрожидкостных устройств для систем «лаборатория на кристалле». Прецизионное моделирование работы таких систем является необходимой стадией их разработки. В данной работе описаны результаты моделирования элементов биосенсора с микрожидкостным элементом (рис. 1). Конструкция элемента бралась из [1]. Было промоделировано движение жидкости по капиллярам на участке гидравлического сопротивления (а) и клапана задержки (б). При введении в микрожидкостное устройство контролируемого раствора он проходит через петлеобразную микроструктуру каналов (рис. 1, а) для получения максимально равномерного расхода под действием капиллярных сил, создаваемых молекулярным насосом (рис. 1, d); затем через змеевидные капилляры (рис. 1, б), чтобы предотвратить засорение и формирование воздушных пузырей в канале. В середине этого участка сечение капилляра увеличено для создания резервуара для хранения реактива, после прохождения которого образец проходит через реакционную камеру (рис. 1, с), в которой производится оптическое сканирование образца [1].

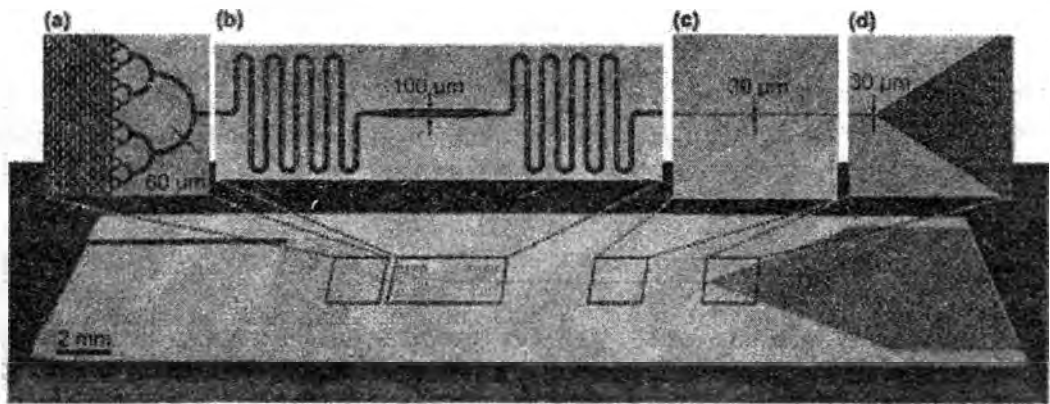


Рис. 1. Микрожидкостное устройство биосенсора [1].

Основной целью моделирования является изучение зависимости выходных гидродинамических параметров жидкости от скорости и давления на входе микрожидкостного канала. Для решения данной задачи используется метод конечных элементов. Для исследования течения используется модель несжимаемой весомой жидкости. Течение жидкости предполагается нестационарным и турбулентным. Для замыкания уравнений турбулентности течения жидкости используется RNG - модель турбулентности [2].

Двумерная математическая модель течения жидкости в продольном сечении капилляра (ось у направлена вдоль его главной оси) имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_y) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_y V_x) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_y V_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y}), \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_y) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x V_y) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y V_y) = \rho g - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y k) = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_t \frac{\partial k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_t \frac{\partial k}{\partial y}) + \mu_t \Phi - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x}(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (5)$$

Здесь

$$\mu_e = \mu + \mu_t, \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

$$C_{1\varepsilon} = 1,42 - \frac{\eta(1-\eta/4,38)}{1+0,12\eta^3}, \quad (7)$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2(\frac{\partial V_x}{\partial x})^2 + 2(\frac{\partial V_y}{\partial y})^2 + (\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y})^2}, \quad (8)$$

$$\Phi = 2((\frac{\partial V_x}{\partial x})^2 + (\frac{\partial V_y}{\partial y})^2 + \frac{1}{2}(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y}))^2, \quad (9)$$

где ρ – заданная постоянная плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, V_x, V_y – проекции вектора скорости жидкости, p – избыточное давление жидкости, μ – заданная физическая (ламинарная) вязкость, μ_t – турбулентная (вихревая) вязкость, μ_e – эффективная вязкость, k – кинетическая энергия турбулентности, ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, $C_\mu, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – эмпирические константы RNG- модели турбулентности, $C_\mu = 0,085, C_2 = 1,68, \sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0,72$.

Специфика задач гидродинамики течений со свободными границами заключается в задании граничных условий на неизвестной до решения задачи границе раздела сред: кинематического и динамического граничных условий. Если $F(t, x, y) = 0$ – уравнение свободной поверхности, то кинематическое граничное условие имеет вид

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(F V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(F V_y) = 0. \quad (10)$$

Условие (10) означает, что частица жидкости, вышедшая на свободную поверхность, остается на ней во всем последующем движении. Динамическое граничное условие имеет вид

$$p = 0 \quad (11)$$

на границе $F(t, x, y) = 0$ и выражает непрерывность давления при переходе через свободную границу.

На неподвижных твердых стенках в каждый момент времени должны выполняться условия прилипания

$$V_x = 0, V_y = 0. \quad (12)$$

Границу s будем считать выходной и полагать, что на ней должны выполняться естественные условия Неймана

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = 0, \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0, \frac{\partial p}{\partial x} = 0. \quad (13)$$

Для выполнения трехмерного моделирования используется пакет ANSYS CFX. Течение жидкости нестационарно (стационарные задачи со свободными границами решаются в системе ANSYS только в нестационарной постановке): в задаче помимо граничных условий должны выставляться и начальные условия. Начальные условия примем тривиальными для V_x, V_y и p .

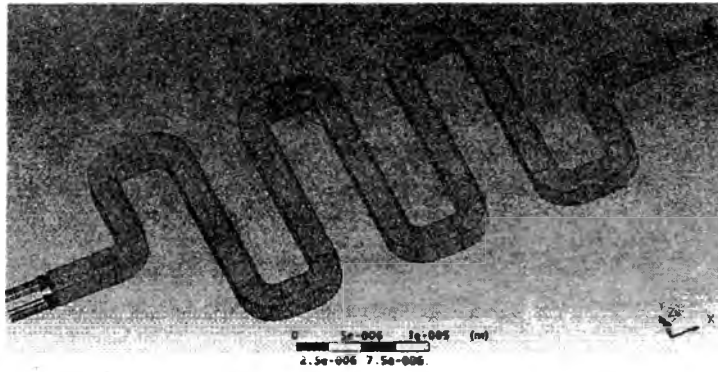


Рис. 2. Трехмерная модель участка гидродинамического сопротивления

При моделировании участка гидравлического сопротивления (рис. 2) ставилась задача определить параметры, которыми можно использовать для управления потоком жидкости в капилляре. По участку гидравлического сопротивления течет вода, плавучесть отсутствует, рассматривается установившийся процесс, перенос тепла отсутствует. На вход подается поток воздуха или воды, на выходе среднее статическое давление 1 атм, стенки капилляра гладкие и на них отсутствует проскальзывание, поток жидкости инфразвуковой.

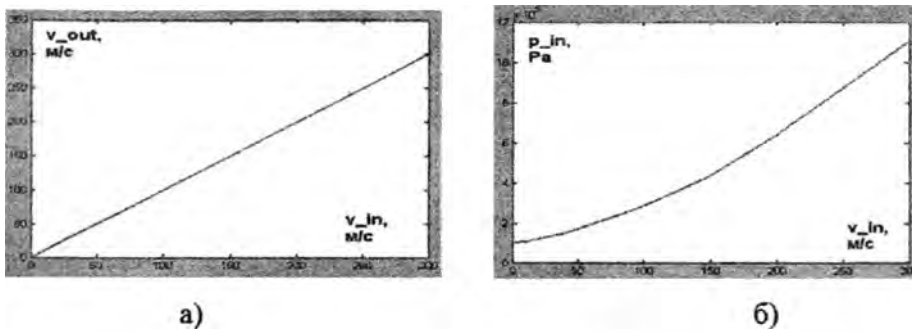


Рис. 3. а) зависимость выходной скорости от входной скорости (воздух) и б) зависимость входного давления от входной скорости (воздух)

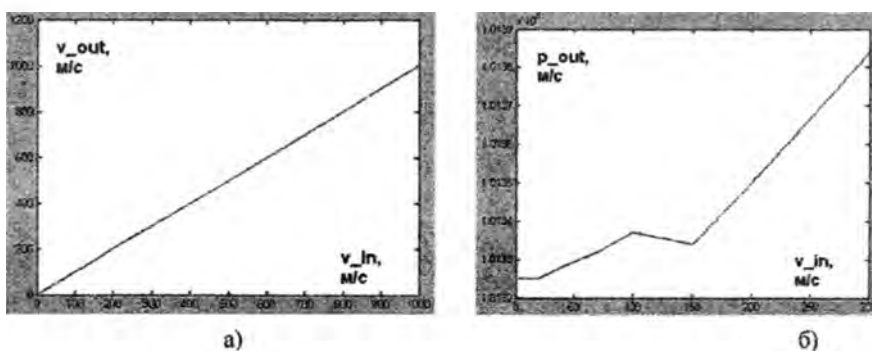
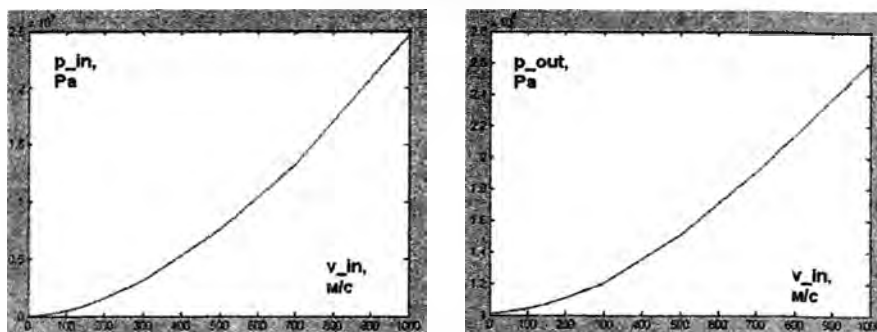


Рис. 4. а) зависимость выходного давления от входной скорости (воздух) и б) зависимость выходной скорости от входной скорости (вода)

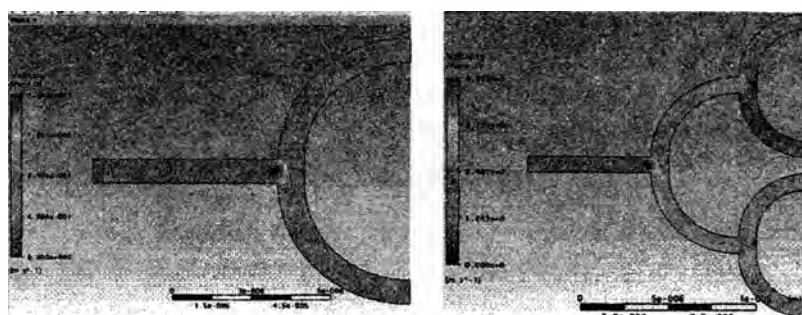
Для анализа зависимости выходных параметров от входных изменяли значение скорости для воздуха и воды в диапазоне 1-300 м/с и 1-1000 м/с соответственно. По полученным данным построены графики зависимостей выходной скорости, входного давления и выходного давления от входной скорости для воды и воздуха (рис. 3-5).

Далее проводилось моделирование участка клапана задержки, который необходим в микрожидкостных структурах для получения необходимого капиллярного давления. Используются различная форма клапанов задержки, чтобы сделать более пологим фронт поступления жидкостей в капиллярных насосах, получить надежное поведение при заполнении канала и минимизировать риск попадания воздуха в канал.



а) б)
 Рис. 5. а) – Зависимость входного давления от входной скорости (вода); б) – зависимость выходного давления от входной скорости (вода)

Моделирование позволило выяснить распределение потока по рукавам точек ветвления канала. При разделении потока на две ветви поток распределяется достаточно равномерно (рис. 6, а), в то время как при разделении на четыре ветви распределение становится неравномерным (рис. 6, б) и чувствительным к расчетной сетке.



а) б)
 Рис. 6. Распределение потока в точках ветвления участка задержки устройства:
 а) ветвление на два; б) на четыре рукава

В результате моделирования установлено, что управление скоростью и давлением жидкости на выходе микрожидкостного устройства можно посредством изменения давления на его входе. Особую трудность вызывает проектирование надежного участка задержки вследствие неустойчивости гидродинамического течения в ветвящейся системе каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Gervais, E. Delamarche. Toward one-step point-of-care immunodiagnosics using capillary-driven microfluidics and PDMS substrates. // Lab Chip, 2009, N9, p.3330 – 3337. 2. Шабаров В.В. Применение системы ANSYS к решению гидрогазодинамических задач // Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». - Нижний Новгород, 2006, 108 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИК-СПЕКТРОВ МАССИВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ПАКЕТЕ NAMD

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

При разработке наносистем различного назначения важное значение имеет развитие методов характеризации и контроля качества наноматериалов, используемых в их конструкциях. Вследствие малости размеров элементов наносистем традиционные методы контроля материалов, используемые в машиностроении, в данном случае неприменимы и требуется разработка новых подходов, основанных на более тонких физических эффектах. При этом необходимо получать как сведения о микроскопической структуре и состоянии образца, так и его интегральные характеристики. Поэтому представляется актуальным изучение спектральных характеристик наносистем в широком частотном интервале, включающем как собственные частоты индивидуальных элементов наносистем, так и частоты, характеризующие наносистему в целом. В применении с наносистемам на основе углеродных нанотрубок (УНТ) этот интервал включает область от СВЧ до ИК диапазонов электромагнитной шкалы [1].

Использование спектральных свойств для характеризации наносистем предполагает изучение влияния различных физических и структурных параметров материалов на спектральные характеристики, в котором важную роль играет компьютерное моделирование. Вследствие сложности динамики наносистем необходимо использовать иерархический подход к моделированию, включающий микроскопический, мезоскопический и макроскопический уровни [2]. С точки зрения затрат компьютерных ресурсов и точности наиболее приемлемым методом моделирования спектров наносистем на основе УНТ представляется метод молекулярной динамики. Этот метод подразумевает вычисление траекторий всех атомов системы численным решением классических уравнений движения с использованием эмпирически определяемых потенциалов межатомных сил [3].

В данной работе для молекулярно-динамического моделирования использовался свободно распространяемый пакет NAMD [4] под управлением операционной системы Fedora 11. Пакет NAMD базируется на силовом поле CHARMM, разработанном в основном для аппроксимации межатомного взаимодействия в биополимерах. Его применение для моделирования углеродных нанотрубок представляется поэтому вполне оправданным.

Пакет имеет следующие характерные черты:

- Силовое поле CHARMM учитывает многочастичные связывающие взаимодействия между 2, 3 и 4 атомами и парные несвязывающие взаимодействия: электростатические и ван-дерваальсовские.
- Пакет включает алгоритм Эвальда для расчета полного электростатического взаимодействия в системе.
- Пакет использует алгоритм Верле для расчета будущих значений координат и скоростей атомов. Для снижения временных затрат при расчете дальнедействующих электростатических сил применяется разностная схема с несколькими шагами по времени. Локальные взаимодействия вычисляются на каждом шаге, а дальнедействующие – один раз за несколько шагов.
- В пакете реализованы следующие возможности: молекулярная динамика при постоянной энергии, молекулярная динамика при постоянной температуре за счет переопределения скоростей, ланжевенковская динамика, возможность задать периодические граничные условия для рассматриваемой системы, молекулярная динамика при постоянном давлении, алгоритмы поиска минимума энергетической функции, возможность фиксации координат части атомов системы, использование жестких моделей для молекул воды, задание жестких водородных связей, возможность задания периодических воздействий на систему.
- Использование графического интерфейса VMD позволяет реализовать интерактивную молекулярную динамику с приложением сил к набору атомов.

- Сбалансированная нагрузка на все используемые процессоры.

Хотя моделирование больших систем, включающих сотни тысяч и миллионы атомов, методом молекулярной динамики требует больших вычислительных затрат, системы размером до нескольких десятков тысяч атомов могут моделироваться на персональном компьютере. Пакет NAMD работает эффективно в обоих случаях и обладает хорошей параллелизуемостью.

Особый интерес для исследования спектральных методов характеристики массивов нанотрубок представляет возможность вычисления электромагнитных спектров поглощения молекулярных систем, имеющаяся в графическом интерфейсе NAMD. Спектр вычисляется как преобразование Фурье от автокорреляционной функции дипольного момента системы, которая, в свою очередь, вычисляется по временным рядам метода молекулярной динамики. В данной работе вычислены спектры поглощения индивидуальной нанотрубки диаметром 13 и длиной 100 Å с хиральными параметрами {10,10} с внедренными в ее крышку положительным и отрицательным единичными зарядами на близком расстоянии и аналогичные спектры массивов из 7 и 19 УНТ, образующими правильные треугольные решетки с расстояниями между трубками в диапазоне 4-24 Å, в которых пары зарядов задавались только на центральной трубке. На рис. 1 представлена геометрия исследуемых систем, а на рис. 2 – полученные спектры поглощения в частотном диапазоне 0-500 см⁻¹.

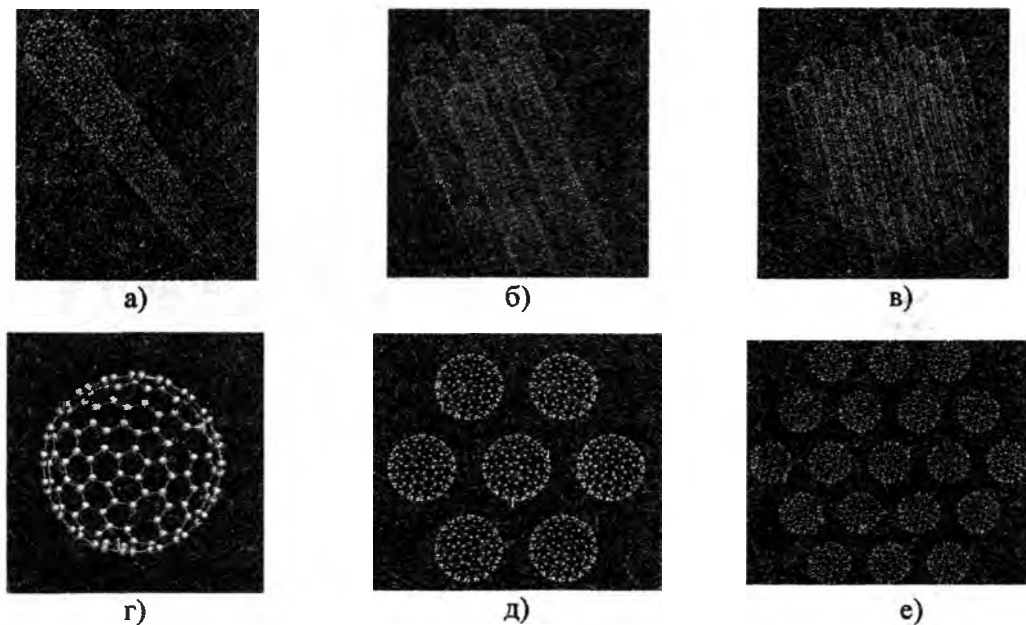


Рис. 1. Индивидуальная УНТ и массивы УНТ {10,10}: а)–в) вид сбоку; г)–е) вид сверху и расположение внедренной пары зарядов

Полученные спектры демонстрируют резонансный характер поглощения массивами УНТ электромагнитного поля, обусловленный наличием в системе собственных частот механических колебаний. Тем самым подтверждаются результаты расчетов в континуальном приближении, в которых взаимодействие нанотрубок в массиве осуществлялось только через подложку [1]. Особый интерес представляет наличие спектральных окон прозрачности массивов, разделяющих области острых резонансных пиков.

Зависимость спектров от геометрии массива носит весьма сложный характер из-за вклада дальнедействующих вандерваальсовых взаимодействий. На рис. 3 представлены индивидуальные спектры массивов с различным числом трубок и различным расстоянием между трубками в низкочастотной области 0 – 300 см⁻¹, в которой резонансное поглощение индивидуальной нанотрубки практически отсутствует. Для контроля геометрии массива наибольший интерес представляет пик поглощения на частоте 25 см⁻¹, что соответствует 750 ГГц. Величина этого пика явно коррелирует с расстоянием между нанотрубками в массивах. Положение этого пика зависит от длины нанотрубки и сдвигается вниз по шкале частот с ее увеличением

обратно пропорционально этой длине. Для трубок длиной 1 мкм пик попадает в диапазон 5–10 ГГц и может изучаться в СВЧ-резонаторах миллиметрового диапазона.

Полученные данные демонстрируют возможность разработки спектральных методов контроля геометрических характеристик массивов нанотрубок. Кроме того, существенные отличия спектров рассмотренных систем свидетельствуют о возможности использования массивов углеродных нанотрубок в наносенсорике.

Наличие корреляции других пиков с геометрией массивов требует дополнительного исследования.

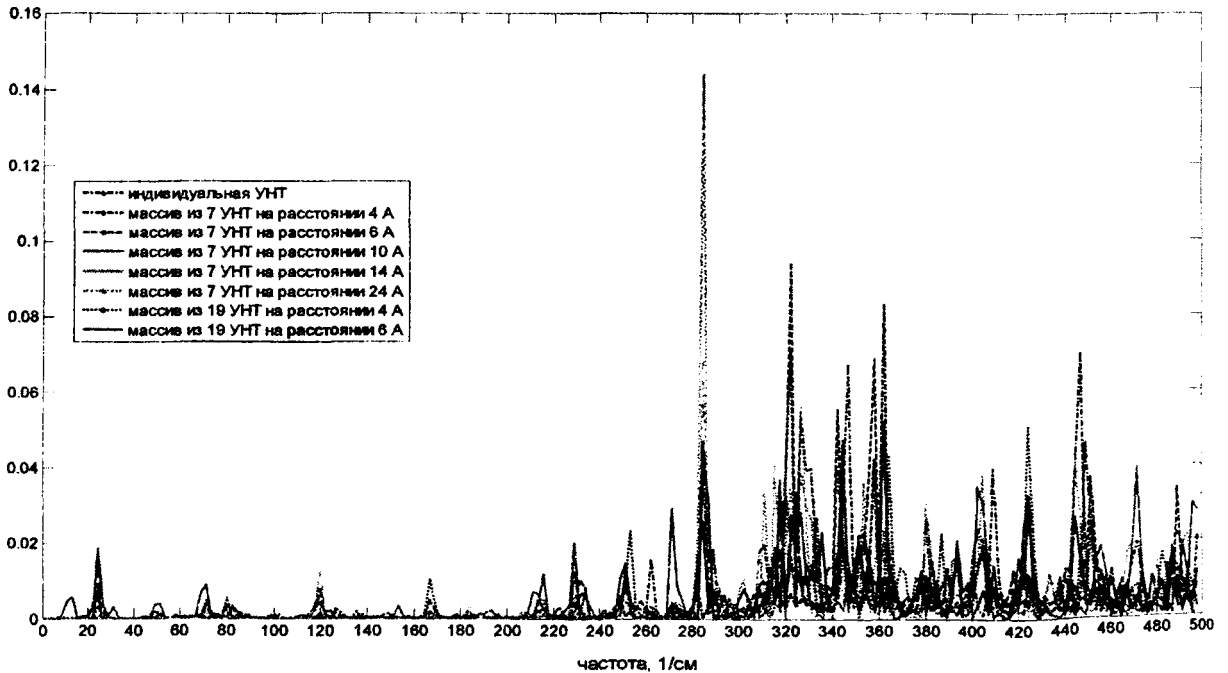


Рис. 2. Спектры поглощения индивидуальной УНТ и массивов УНТ



Рис. 3. Спектры поглощения индивидуальной УНТ и массивов УНТ в относительных единицах в низкочастотной области

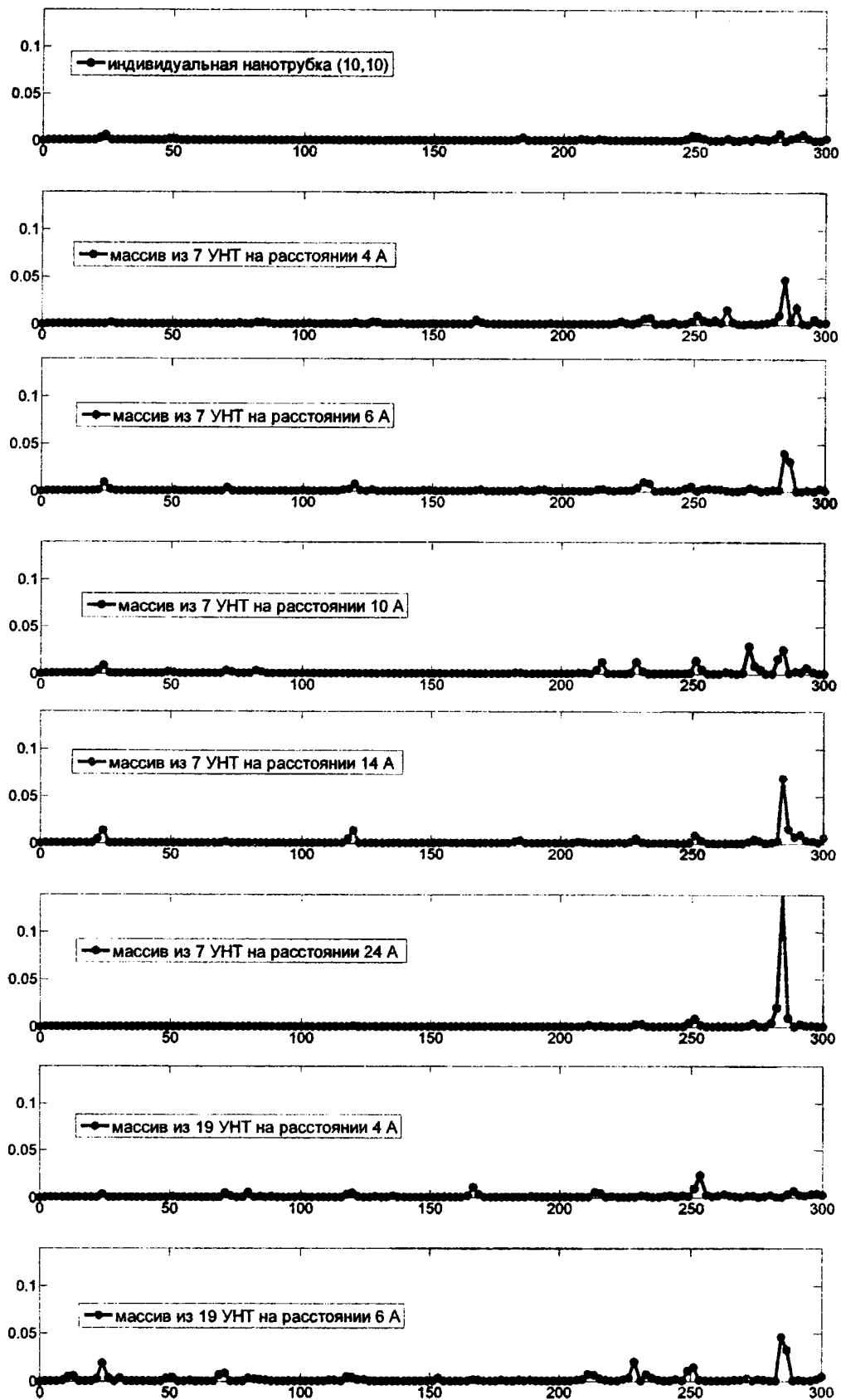


Рис. 3 (продолжение). Спектры поглощения индивидуальной УНТ и массивов УНТ в относительных единицах в низкочастотной области

ЛИТЕРАТУРА

1. V.V. Barkaline, P.A. Zhuchak. Resonant properties of ordered carbon nanotube arrays// *Proc. SPIE 7377, 73770I* (2008) p.1-9.
2. В.В. Баркалин, С.В. Медведев, В.В. Нелаев, П.А. Случак, С.Н. Юркевич. Иерархическая система моделирования физических процессов и свойств материалов на базе суперкомпьютерной конфигурации СКИФ К-1000// Научный сервис в сети Интернет: решение больших задач: Труды Всероссийской научной конференции (22-27 сентября 2008 г., г. Новороссийск).- М.: Изд-во МГУ, 2008. - 468 с. с.101-105.
3. D. Frenkel, B. Smit. *Understanding Molecular Simulation: From Algorithms to Applications* – San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Tokio: Academic Press, 2002, 658 p.
4. J.C.Phillips, R.Braun, W.Wang, J.Gumbart, E.Tajkhorshid, E.Villa, C. Chipot, R.D.Skeel, L. Kale, and K.Schulten. Scalable molecular dynamics with NAMD// *J. Comp. Chem.* – 26.- 2005. – p.1781-1802.

УДК 621.7.044.2

*Загурняк М.В., Драгобецкий В.В., Пирогов Д.Л.,
Коноваленко А.Д., Маркевич А.Б.*

МОДУЛЬНАЯ ВЗРЫВОУДАРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ, НАНОПОКРЫТИЙ И НАНОЛЕГИРОВАНИЯ

*Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского,
Кременчуг, Украина*

Регенерация утилизированных изделий из твердых сплавов связана с необходимостью их дробления. Одной из перспективных технологий дробления является метод дробления утилизированных изделий из твердых сплавов с использованием импульсных источников энергии, в частности, бризантных взрывчатых веществ. Многократное воздействие ударно-волнового нагружения на твердый сплав приводит к получению фракций размерами от 10^{-8} - 10^{-2} м. Ультрадисперсные фракции могут после обогащения использоваться для получения твердосплавных пластин, волок, пластин бронезилетов, элементов конструкции штампов.

Многофакторность явлений, сопровождающих процессы ударно-волнового нагружения позволяет помимо дробления лома твердых сплавов, производить взрывное легирование инструмента из углеродистых, легированных и быстрорежущих инструментальных сталей наночастицами карбида вольфрама, осуществлять процесс быстрой кристаллизации. Последнее достигается в специальных камерах с намагниченным поршнем, который обеспечивает косое соударение утилизированных твердых сплавов с образованием встречных кумулятивных струй. Для этих целей наиболее целесообразно использование многокамерных систем.

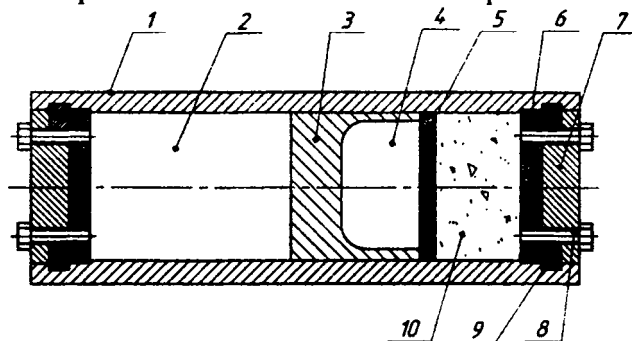


Рис. 1. Модель конструкции взрывоударного контейнера с демпфирующей подушкой: 1 - цилиндр; 2 - ударная камера; 3 - поршень-ударник; 4 - взрывная камера; 5 - разделительная шайба; 6 - опорная крышка; 7 - стопорная крышка; 8 - болт; 9 - опорное полукольцо; 10- демпфирующая подушка.

Модульная конструкция многокамерного взрывоударного контейнера позволяет комбинировать, в зависимости от параметров и свойств твердосплавных отходов; типа, применяемой

взрывчатки; объемов и глубины их переработки – любую комбинацию составления элементов конструкции.

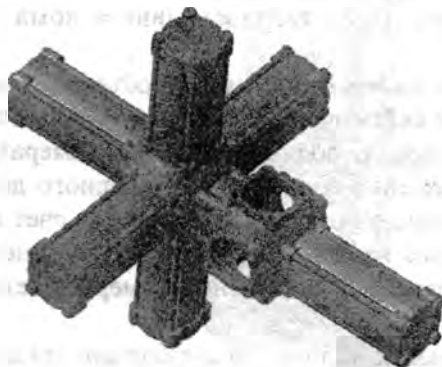


Рис. 2. Модульная конструкция многокамерного взрывоударного контейнера для совмещенного многостадийного дробления твердосплавных отходов

На рис. 3 показана конструкция модуля ударного цилиндра.

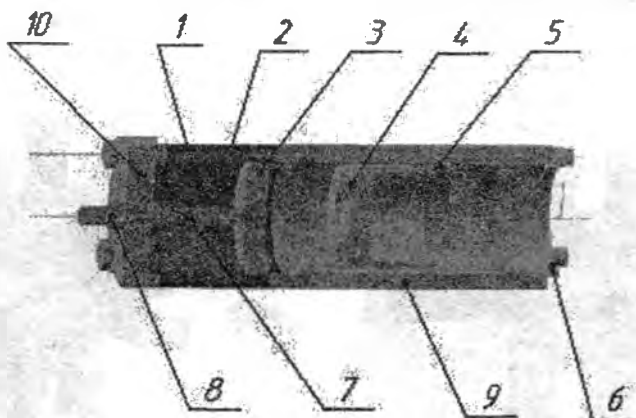


Рис. 3. Модуль ударного цилиндра: а) крепление элементов болтами:
1 – капсула; 2 – ударная камера; 3 – передающая шайба; 4 – поршень-ударник; 5 – конус поршня;
6 – пояска цилиндра, который фиксирует поршень-ударник; 7 – цилиндр капсулы из нержавеющей стали;
8 – крышка капсулы; 9 – цилиндр; 10 – стяжной болт.

Ударный цилиндр (рис. 3) имеет пояска 6, диаметр которого несколько меньше его рабочего диаметра. Указанный пояска используется для фиксации поршня-ударника 4 за счет легкого заклинивания по внешней поверхности конуса 5 в крайнем положении. Это обеспечивает однозначное начальное положение поршня-ударника вне зависимости от его пространственного положения. Таким образом, в любом положении ударного цилиндра движение поршня ударника начинается при взрыве заряда ВВ во взрывной камере из одного и того же положения относительно торца цилиндра.

Камера для размещения крошки выполнена в виде специальной капсулы 1. Детали капсулы изготавливаются из нержавеющей материала. Это позволяет изготавливать все другие детали контейнера из обычных сталей. Крошка, которая загружается во внутреннюю полость капсулы, уплотняется шайбой 3 с помощью стяжного болта 7 и гайки 8. Предварительное уплотнение крошки создает более благоприятные условия для ее дробления. Шайба уплотнителя может свободно перемещаться вдоль оси по направлению удара по ней поршня - ударника и передавать ударную волну, давление продуктов взрыва непосредственно на крошку. После нанесения удара капсула снимается, разбирается, и производится сортировка крошки по размерам фракций просеиванием. Изолированное от взрывной камеры размещение ударной камеры позволяет обеспечить эффект «чистого» механического дробления твердосплавных отходов на завершающих стадиях дробления. Это особенно важно для получения крошки качественной кондиции.

Модульная конструкция контейнера обладает большой гибкостью ее компоновки. Это позволяет обеспечить необходимые требования дробления отходов в зависимости от заданных объемов и глубины переработки твердосплавных отходов, а также производить селективное дробление разных групп твердосплавного лома одновременно от взрыва одного заряда ВВ.

Замена одной взрывной камеры, равными по объему ей несколькими более малыми по размерам резко снижает общее сейсмическое действие ударных волн в целом на конструкцию контейнера и окружающую среду, проводя в нескольких камерах последовательное короткозамедленное взрывание. Одновременно со снижением ударного действия на конструкцию улучшаются условия дробления в каждой отдельной камеры за счет взаимного прохождения ударных волн камер и многократного их воздействия на загруженный в них твердосплавный лом. Последовательное взрывание зарядов во взрывных камерах увеличивает длительность воздействия взрыва при дроблении отходов.

В зависимости от реальных условий эксплуатации многокамерных модульных конструкций возможны различные их комбинации пространственного расположения относительно друг друга. Так, на рис. 4 показана конструкция с последовательным расположением взрывных камер, а на рис. 5 – гнездовое (радиальное) размещение камер. Каждый из рассматриваемых вариантов обладает определенной спецификой взаимодействия ударных волн, а, следовательно, и эффективностью дробления.

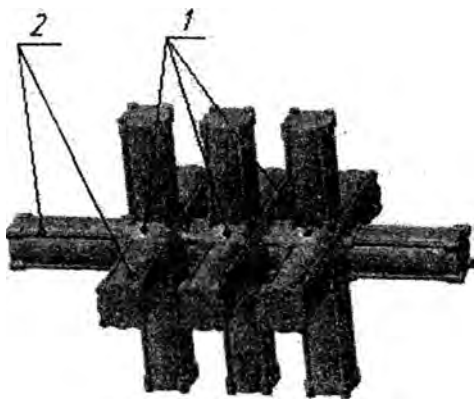


Рис. 4. Многокамерный взрывоударный модульный контейнер с последовательным расположением взрывоударных модулей: 1 - взрывные камеры; 2 - ударные цилиндры.

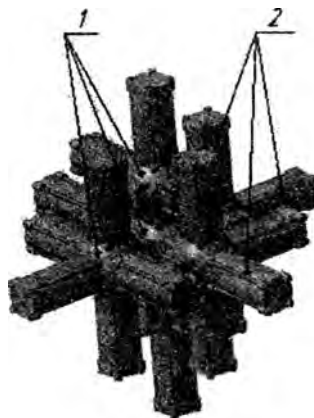


Рис. 5. Многокамерный взрывоударный модульный контейнер с гнездовым(радиальным) расположением взрывоударных модулей: 1 - взрывные камеры; 2 - ударные цилиндры.

Показанные на рис. 4 и 5 компоновки модульных контейнеров могут быть использованы в случае:

- необходимости дробления относительно большого количества лома;
- обеспечения углубленной проработки фракций крошки;
- при повышенных требованиях к снижению сейсмике;
- при дроблении твердосплавных отходов отличающихся по типам твердых сплавов;
- при необходимости получения крошки разной по гранулометрическому составу.

На рис. 6 показана установка, в которой взрывоударный контейнер подвешен на цепях (возможны любые другие виды нежестких связей). Такая установка позволяет значительно снизить сейсмическое действие ударных волн на фундаменты и наружные ограждения строительных сооружений.

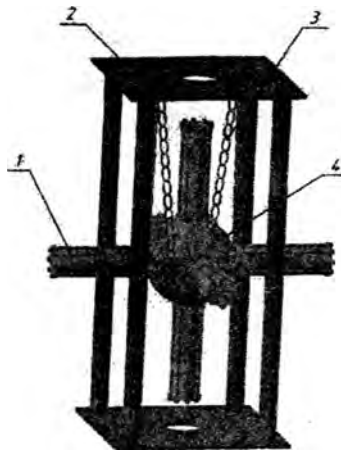


Рис. 6. Установка взрывоударного контейнера: 1 - ударный цилиндр; 2 - основание установки; 3 - цепь; 4 - взрывная камера.

Конструкция модуля взрывоударного контейнера, показанная на рис. 7 отличается типом крепления его элементов и способом уплотнения крошки в ударной камере. В этой конструкции вместо болтовых соединений используется байонетные замковые соединения. Это позволяет не только повысить надежность и прочность крепления элементов конструкции, но и, что не менее важно, снизить трудоемкость сборки и разборки модуля при загрузке и сортировке крошки. При этом возможно раздельное раскрытие, как взрывной камеры, так и ударной. Это способствует также более удобному выполнению операций загрузки и выгрузки крошки во взрывоударном контейнере.

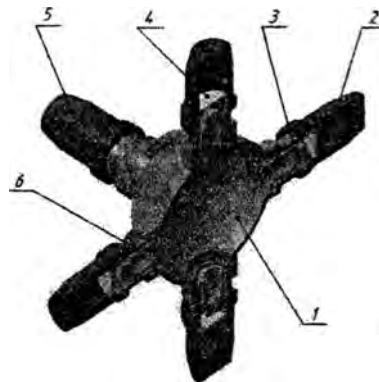


Рис. 7. Модульная конструкция взрывоударного контейнера с байонетным замковым креплением ударных модулей: 1 - взрывная камера; 2 - ударная камера; 3 - поршень-ударник; 4 - передающая шайба; 5 - капсула; 6 - ударный цилиндр.

В капсуле ударного цилиндра с байонетовым креплением (рис. 8) так же изменена конструкция уплотнения крошки в ударной камере. Уплотнение осуществляется с помощью внутреннего резьбового кольца 4. Кольцо расположено непосредственно внутри капсулы. Такое расположение резьбового кольца позволяет обеспечить лучшую изоляцию крошки в ударной камере и более свободное перемещение ударной шайбы при передаче ударного импульса на крошку.

При ударе поршня-ударника по передающей шайбе ударная волна и усилие удара не полностью затрачиваются на дробление твердосплавной крошки и ударная нагрузка воспринимается торцевыми крышками и стяжными болтами крепления цилиндра. Кроме того, эффективность дробления крошки в ударной камере в большой степени зависит от «жесткости наковальни», роль которой играет крышка. Поэтому она должна обладать повышенной массой в сравнении с массой поршня-ударника, жестким креплением к цилиндру.



Рис. 8. Капсула ударного цилиндра и сферическая взрывная камера с байонетным креплением;
1 - корпус капсулы; 2 - резьбовое кольцо; 3 - передающая шайба.

Для снижения ударных нагрузок на крепежные элементы контейнера разработана конструкция взрывоударного контейнера с ударными камерами встречного действия (рис. 9). Синхронные удары движущихся навстречу друг друга поршней ударников не требуют наличия жесткого основания «наковальни», воспринимающей удар, так как ударные усилия при этом взаимно компенсируются. Это повышает надежность, долговечность и эффективность конструкции в целом.

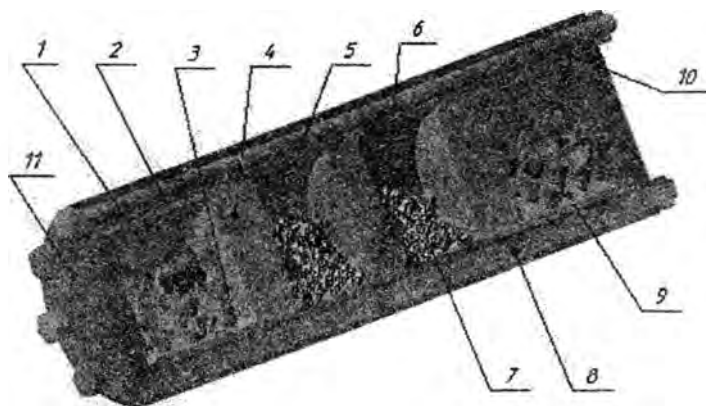


Рис. 9. Четырехкамерный взрывоударный контейнер с компенсацией ударных нагрузок:
1 - взрывная камера; 2 - заряд ВВ в патроне из твердого сплава; 3 - твердосплавный лом;
4 - поршень-ударник; 5 - ударная камера; 6 -; 7 - твердосплавная крошка;
8 - стяжной болт; 9 - взрывная камера; 10 - цилиндр; крышка.



Рис. 10. Взрывоударный контейнер с загрузочными окнами и защитным кожухом-затвором:
1 - взрывная камера; 2 - поршень-ударник; 3 - кожух-затвор; 4 - цилиндр с загрузочными окнами;
5 - загрузочные окна; 6 - перегородка

Однако, в связи с большой чувствительностью максимального давления газов при взрыве от начальных условий воспламенения и горения (температуры прогрева ВВ, интенсивности теплообмена между ВВ твердосплавным ломом, стенками взрывной камеры и других факторов) ВВ, возможность и необходимость синхронизации взрывов во взрывных камерах требует проведения дополнительных исследований. При несинхронном соударении поршней-ударников геометрические параметры разделяющей перегородки должны обеспечивать эффективность удара «запаздывающего» поршня-ударника по крошки, начавшей перемещение (уплотнение) от удара «опережающего» поршня-ударника.

Конструкция взрывоударного контейнера (рис. 10) имеет мощный защитный кожух-затвор 3, в котором предусмотрены загрузочные окна открывающий свободный доступ в ударные камеры. Цилиндр контейнера 4 также имеет соответствующие загрузочные окна ударных камер. Защитный кожух-затвор может свободно поворачиваться вокруг оси цилиндра.

Это позволяет совмещать загрузочные окна цилиндра и кожуха-затвора для доступа в ударные камеры при загрузке и выгрузке крошки. И перекрывать загрузочные окна для обеспечения операции

дробления крошки. Такая конструкция позволяет значительно снизить трудоемкость и время загрузочно-разгрузочной операции крошки.

Проведены испытания твердосплавных пластин, полученных по традиционной технологии из наночастиц регенерированных сплавов и комбинированной технологии (дробление до фракций 3 мм с последующим перемолом). Наибольшей износостойкостью обладают твердосплавные пластины из наночастиц, наименьшей – полученные по комбинированной технологии.

Таким образом, модульная конструкция многокамерного взрывоударного контейнера для совмещенного многостадийного дробления твердосплавного лома из отходов машиностроительного производства с целью двойного их использования в инструментальном производстве целесообразно для создания маломерных взрывоударных контейнеров, которые могут использоваться на действующих производствах.

УДК 536.2

Клус С.А., Покульницкий А.Р., Ширвель П.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОПЛИВА И ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА С ПОМОЩЬЮ МКЭ В СРЕДЕ ANSYS

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время решение задач развития атомной энергетики Республики Беларусь высоко актуально. А рост инновационного потенциала атомной энергетики напрямую зависит от объемов научно-исследовательских разработок в этой области. Поэтому очевидно, что проведение исследований, связанных с моделированием технологических процессов и функционирования элементов объектов атомной промышленности столь необходимо и важно.

Известно, что комплексы CAD и CAE позволяют ускорять процессы проектирования и исследования различных конструкций (в том числе и в области атомного машиностроения). Очевидно, что использование современных методов вычислений, реализованных в комплексах CAD (система автоматизированного проектирования), дает возможность проводить исследования различных характеристик проектируемых объектов, что позволяет менять конструкцию этих объектов без создания экспериментальных образцов и не прибегать к длительной и дорогостоящей процедуре натурных исследований. Отметим, что среди средств CAE (средства обеспечения исследований) важное место занимают комплексы метода конечных элементов (МКЭ, FEA), позволяющие проводить имитационное моделирование работы исследуемой конструкции на основе подробного описания ее геометрии, физики моделируемых процессов, свойств применяемых материалов, эксплуатационных характеристик и иных указываемых пользователем исходных и начальных данных. Среди комплексов МКЭ можно указать такие продукты, как ANSYS, CosmosWorks, Catia, Pro/ENGINEER, MSC/NASTRAN, Unigraphics, ABAQUS, EnSight и другие.

Согласно работам [1,2] безопасная работа любого ядерного реактора зависит в первую очередь от надёжной работы его тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), имеющих, как правило, цилиндрическую или сферическую геометрию. Тепловыделяющие элементы представляют собой устройства, содержащие твердое ядерное горючее и обеспечивающие при помещении их в активную зону реактора цепную реакцию деления и генерацию тепловой энергии. Изучение деформирования цилиндрического ТВЭЛА имеет большое значение, так как оно определяет кинетику изменения напряжений и деформаций в тепловыделяющей сборке (ТВС) и активной зоне ядерного реактора АЭС.

Заметим, что выбор того или иного типа ТВЭЛов производится на основе тщательного учета условий их эксплуатации в каждом конкретном реакторе. ТВЭЛы быстрых реакторов, как правило, имеют стержневую (цилиндрическую) конструкцию, располагаются вертикально в реакторе, в их объеме содержится ядерное горючее (UO_2). Типовой ТВЭЛ с твердым ядерным топливом, представляющий собой цилиндрический стержень, включает следующие основные части: топливный сердечник; контактный слой; оболочку; заглушки; концевые детали; дистанционирующие детали (рис.1). Оболочки, концевые и дистанционирующие детали изготавливаются из коррозионно-

устойчивых в среде теплоносителя конструкционных материалов, обладающих необходимыми прочностными свойствами и совместимых (не взаимодействующих) с материалами атомного топлива. Оболочки служат для изоляции активного объема от теплоносителя и предотвращения возможности загрязнения первичного циркуляционного контура реактора частицами ядерного горючего и продуктами его деления. В современных ядерных реакторах наиболее широкое распространение получили твэлы с твердым ядерным топливом. В таких твэлах передача тепла, выделяющегося в сердечнике, к его охлаждаемой теплопередающей поверхности происходит посредством теплопроводности и характеризуется коэффициентом теплопроводности ядерного горючего. Причем процесс передачи тепла складывается из передачи тепла от сердечника к материалу контактного слоя, переноса тепла через слой к материалу оболочки и прохождения тепла через материал оболочки.

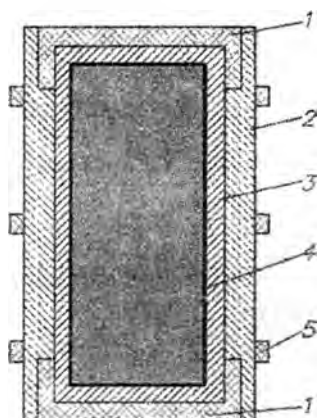


Рис.1. Схема конструкции твэла:
1 – заглушка, 2 – оболочка,
3 – контактный слой(зазор),
4 – сердечник твэла, 5 – дистанционирующий элемент

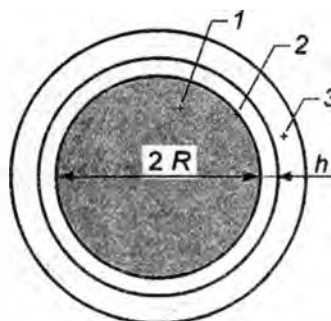


Рис.2. Поперечное сечение твэла:
1 – топливо; 2 – зазор между топливом и оболочкой; 3 – оболочка

Наиболее важное место в оценке работоспособности твэлов занимают термические напряжения. Заметим, что в работе [3] приведены функции распределения упругих термических напряжений в твэле простой формы с равномерно распределенными источниками тепла и формулы для расчета максимальных термических напряжений. Эти формулы получены из интегральных соотношений, выведенных применительно к телам, не испытывающим внешних нагрузок. Примером может служить вывод формул для термических напряжений в полом цилиндре, приведенный в книге С. П. Тимошенко [4]. В действительности же, топливный сердечник испытывает напряжение не только вследствие неравномерного нагрева, но и из-за действия внешнего давления со стороны газового зазора, и контактного взаимодействия топлива и оболочки. Поэтому аналитические интегральные формулы крайне трудно приспособить для расчета термоупругой задачи в случае взаимодействия топлива и оболочки твэла.

В данной статье рассматривается деформирования цилиндрического твэла состоящего из топливной керметной композиции ($UO_2+20\%Cr$ – диоксид урана в матрице из хрома), заключенного в защитную оболочку из холоднодеформированной аустенитовой стали OX16H15M3B (или 316L – зарубежный аналог). Роль контактного слоя в газовом зазоре выполняет гелий, находящийся под давлением. Цель работы – исследовать взаимодействие топливного сердечника и оболочки твэла посредством конечно-элементного моделирования в среде программного комплекс ANSYS. Известно [5,6], что средства термо-прочностного анализа программы ANSYS позволяют использовать результаты решения задачи теплообмена для проведения прочностного анализа [7]. Такая возможность удобна при определении влияния температурного поля на прочность конструкции: можно задать тепловую нагрузку отдельно или в совокупности с механическими нагрузками.

Как известно, одной из причин появления напряжений в сплошном теле является именно неравномерный нагрев. Твэлы активной зоны реактора работают при высоких температурах. Поэтому расчетно-теоретическое исследование НДС твэлов и включает, в первую очередь, определение тем-

пературных полей и возникающих термонапряжений. При этом предполагаем, что теплофизические и механические характеристики материалов остаются неизменными. Это относится и к прочностным свойствам материала.

Решение поставленной термпрочностной задачи определения НДС на базе МКЭ в пакете ANSYS Workbench 11.0 включало в себя следующие этапы:

- построение геометрической модели твэла;
- разбиение модели сечения на конечные элементы;
- моделирование виртуальной нагрузки и граничных условий; определение свойств материала;
- расчет и анализ полученных результатов напряженно-деформированного состояния топливного сердечника.

Расчетная модель основана на предположении, что свойства используемых материалов (таблица 1,2) равны реальным. Также предполагается, что топливо не растрескивается, несмотря на тот факт, что градиент температуры может вызвать в нем разрушающие напряжения. Учет растрескивания топлива при анализе поведения твэла не рассматривается.

Таблица 1 – Физические характеристики керметного топливного сердечника

Величина	Значение
R – радиус топливного сердечника	0.003м
P – внешнее давление на топливный сердечник (давление гелия под оболочкой твэла)	0.1МПа
E – модуль упругости топливной композиции	1.85×10^5 МПа
ν – коэффициент Пуассона топлива	0.29
λ – коэффициент теплопроводности топливной композиции	18 Вт/(м·К)
q_v – тепловыделение в единице объема топливного сердечника	2.234×10^9 Вт/м ³
α – коэффициент линейного расширения топливного материала	11.3×10^{-6} град ⁻¹
T_s – температура в центре топливной композиции	900(1173) °C(K)

Свойства материала контактного слоя (He) и материала оболочки OX16N15M3B указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства материала и характеристики защитной оболочки твэла и контактного слоя (гелия)

Величина	Значение
h^{He} – толщина зазора	0.0007м
δ^{316} – толщина защитной оболочки	0.0009м
P_1^{He} – внутреннее давление на оболочку (давление гелия)	0.1МПа
P_2^{316} – внешнее давление на оболочку (давление теплоносителя)	7.5 МПа
E^{He} – модуль упругости для гелия	1 МПа
ν^{He} – коэффициент Пуассона для гелия	0.3
λ^{He} – коэффициент теплопроводности гелия	15 Вт/(м·К)
Продолжение таблицы 2	
α^{He} – коэффициент линейного расширения гелия	20×10^{-6} град ⁻¹
E^{316} – модуль упругости защитной оболочки	2×10^5 МПа
ν^{316} – коэффициент Пуассона материала оболочки	0.3
λ^{316} – коэффициент теплопроводности оболочки	60.5 Вт/(м·К)
α^{316} – коэффициент линейного расширения оболочки	12×10^{-6} град ⁻¹

Для построения геометрической модели взаимодействия сердечника и оболочки твэла в ANSYS Workbench 11.0 выбираем вкладку Geometry в открывшемся окне при загрузке программы. В блоке Geometry в режиме Sketching создаем чертеж сборки, далее в режиме Modeling создаем геометрию сборки (рис.3). Переходим в режим Simulation, попутно импортируя туда

геометрию модели. Одновременно программный комплекс автоматически сгенерирует две контактные пары: топливо-газ и защитная оболочка-газ.

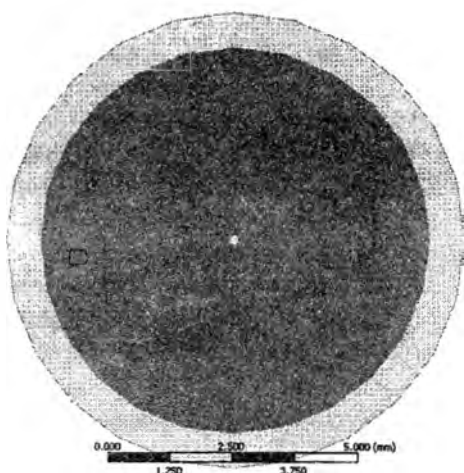


Рис. 3. Поперечное сечение модели твэла в ANSYS

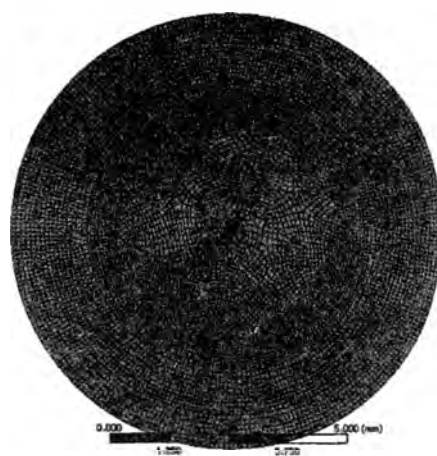


Рис. 4. Модель, разбитая на конечные элементы

Накладываем на модель твэла сетку разбиения, используя пункт панели Meshing. Затем задаём полный размер элемента и разбиваем сборку на конечные элементы, получая в итоге следующую модель (рис.4). Используем в данной задаче вышеуказанные материалы. Задаем их физические и механические свойства в соответствии с реальными рабочими значениями (табл.1,2). Указываем тип решаемой задачи – New Analysis -> Static Structural. Задаем дополнительный тип задачи – New Analysis -> Steady-State Thermal. Описываем состояние окружающей среды (начальные условия) и в блоке Static Structural связываем блоки между собой: определяем величины температур, на границах элементов сборки. Нагружаем модель боковым усилием со стороны газового зазора, а также внешним давлением теплоносителя. Задаем температуру на поверхности сердечника.

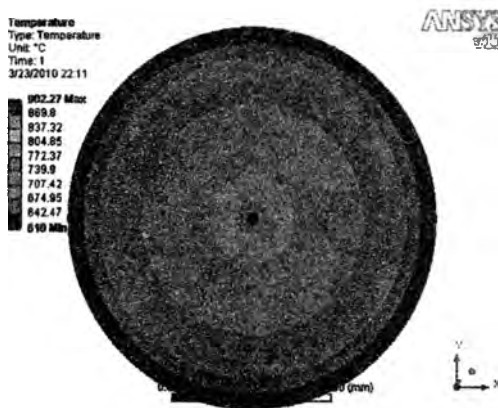


Рис. 5. Распределение температуры (Temperature) по сечению топливного сердечника

Отметим, что для решения данной задачи необходимо связать процессы теплового и прочностного анализов. Для этого выбираем тип решаемой задачи в меню New Analysis: причем, сначала, выполняем температурный анализ (Steady-State Thermal) – получаем температурное поле в модели для заданных граничных условий теплообмена, а затем, опираясь на найденные значения распределения температуры проводим расчет НДС модели твэла (Static Structural), в котором в качестве одного условий Thermal Condition ссылаемся на проведенный Steady-State Thermal анализ (значения температур используются в виде нагрузок на стадиях препроцессорной подготовки и получения решения при последующем прочностном анализе). Таким образом, определяем величины возникающих в

сборке внутренних напряжений, деформаций и перемещений. Ниже (рис. 5) представлено распределение температуры по сечению твэла.

Как видно из рис. 5, максимальная температура в центре сечения топливного сердечника $T=902^{\circ}\text{C}$, а минимальная на внешней поверхности оболочки $T=610^{\circ}\text{C}$.

В конечном итоге, в среде конечно-элементного моделирования ANSYS Workbench получили следующие результаты: распределения температуры (Temperature) вдоль сечения твэла (рис.5); распределение температурных деформаций (Thermal Strain) по сечению модели; совокупные (общие) перемещения (Total Deformation) поперечного сечения твэла (рис.7); интенсивность напряжений (Equivalent Stress) в сечении модели (рис. 6); интенсивность деформаций (Equivalent Elastic Strain) в топливном сердечнике при данном нагружении.

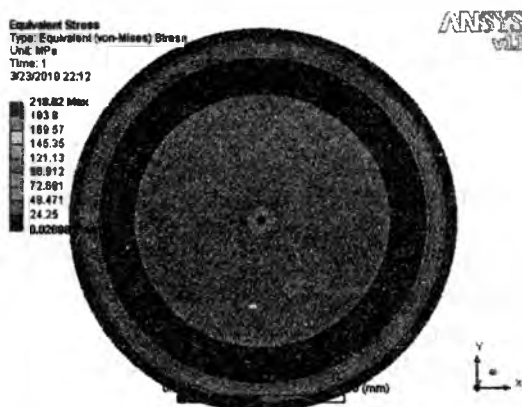


Рис. 6. Интенсивность напряжений (Equivalent Stress) в сечении модели твэла при термосиловом воздействии



Рис. 7. Совокупные перемещения (Total Deformation) по сечению модели керметного твэла при термосиловом воздействии

В результате исследования установили, что температура от центра к внешней поверхности твэла спадает по параболическому закону. Следовательно, центральные участки твэла находятся при более высокой температуре по сравнению с поверхностью, поэтому можем сделать вывод, что приповерхностные области цилиндрического твэла подвержены растягивающим напряжениям, а центральные области – сжимающим. Как видно из рис. 6, действующее на твэл неоднородное температурное поле обуславливает также появление значительных термонапряжений, физическая сущность которых связана с неоднородной температурной деформацией различных участков твэла: в условиях неоднородного температурного поля горячие участки стремятся расшириться, а соседние холодные участки не допускают этого, поэтому горячие (центральные) участки топлива твэла находятся в состоянии сжатия, а более холодные области (защитная оболочка) находятся в состоянии растяжения. Плюс ко всему, отметим, что, для рассматриваемого случая, когда на поверхности твэла, со временем выгорания топлива, появятся трещины или выемки, то макроскопические дефекты сконцентрируют все термонапряжения.

Поэтому, изучение термонапряженного состояния твэлов при выгорании ядерного топлива имеет большое значение и определяет кинетику изменений напряжений и деформаций в активной зоне реактора.

Сравнивая распределение температуры в полученной модели твэла (рис. 5) с распределением температур в сечениях реальных цилиндрических твэлов [3], приходим к полному подобию температурных кривых, что подтверждает правильность решения задачи. Таким образом, произведено моделирование взаимодействия топлива и оболочки твэла с последующим решением температурной и термоупругой задачи в программном комплексе МКЭ ANSYS Workbench 11.0 с последующим сравнением результатов с известными значениями. Целью таких расчетов, в первую очередь, является определение следующих характеристик: рабочих температур, перемещений, возникающих напряжений, а также температурных и эквивалентных деформаций.

В заключении отметим, что окончательное суждение об описанном НДС керметного твэла может быть сделано лишь после соответствующих реакторных испытаний. Однако проектирование элементов активных зон реакторов можно существенным образом облегчить путем использования подобных оценочных расчетов термонапряжений на базе комплекса ANSYS, которые позволяют сразу же, в какой-то мере, приблизиться к наиболее рациональным конструкциям и решениям. Кроме того, распределения напряжений и деформаций, полученные с помощью расчета на базе программного комплекса ANSYS, позволяет довольно быстро получить наглядное представление о наиболее нагруженных и опасных местах в топливном сердечнике твэла. Таким образом, распределение температурного поля может многое сказать о поведении той или иной конструкции в условиях сложного термосилового нагружения.

Благодарности:

Авторы благодарят д.ф.-м.н. И.С.Куликова за плодотворные обсуждения и дискуссии в ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси. Работа выполнена при поддержке гранта БФФИ № Т09М-090 (№ госрегистрации: 20091888).

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248с.
2. Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С.Куликов, Б.Е. Тверковкин.- Мн.: Наука и техника, 1984. – 104с.
3. Займовский А.С. Тепловыделяющие элементы атомного реактора/ А.С. Займовский, В.В. Калашников, И.С. Головин. – М.: Атомиздат, 1979. – 517с.
4. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. - М. Наука, 1979. -551с.
5. Басов К.А., ANSYS в примерах и задачах/ Под общ. ред. Д.Г. Красовского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224с.
6. Басов К.А., Графический интерфейс комплекса ANSYS.–М.: ДМК Пресс, 2006. – 248с.
7. Чигарев А.В., ANSYS для инженеров/ А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение, 2004. – 512с.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МОБИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОГНИТИВНЫМ СОЗНАНИЕМ ЧЕЛОВЕКА

¹ Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Минск, Беларусь

В настоящее время мобильные телефоны являются наиболее развитыми телекоммуникационными системами, а их вредное или благоприятное воздействия на организм человека, на биоинформатику протекающих функциональных и когнитивных процессов в его мозгу вызывают сомнения в виду противоречивых результатов многих научных исследований. Мобильный телефон постоянно, даже в состоянии ожидания вызова, работает в пульсирующем режиме и излучает поток микроволнового излучения (20 МГц – 3 ГГц), который в момент разговора становится наиболее мощным, сложным и амплитудно-модулированным [1]. Особенно сильно подвержена воздействию электромагнитного излучения голова человека, что приводит к изменению функциональной картины мозговых волн, вероятности возникновения отдельных мыслей, времени хранения когнитивных информационных образов в памяти и сознании, а также скорости их распознавания субъектом [2]. Подобные изменения обусловлены особенностями биоинформационной среды человека (кровь, ликвор, слюна, пот, лимфа и др.), электрофизическими и оптическими свойствами кожи, жира, мышц и внутренних органов, а также синхронной активностью нервных клеток мозга, так как при разговоре по мобильному телефону более 70% микроволнового излучения проникает в мозг субъекта. Десинхронизация и синхронизация нейронных ансамблей активно изучаются путем анализа механизмов влияния высокоэнергетических электромагнитных полей микроволнового диапазона и управления когнитивным сознанием субъекта.

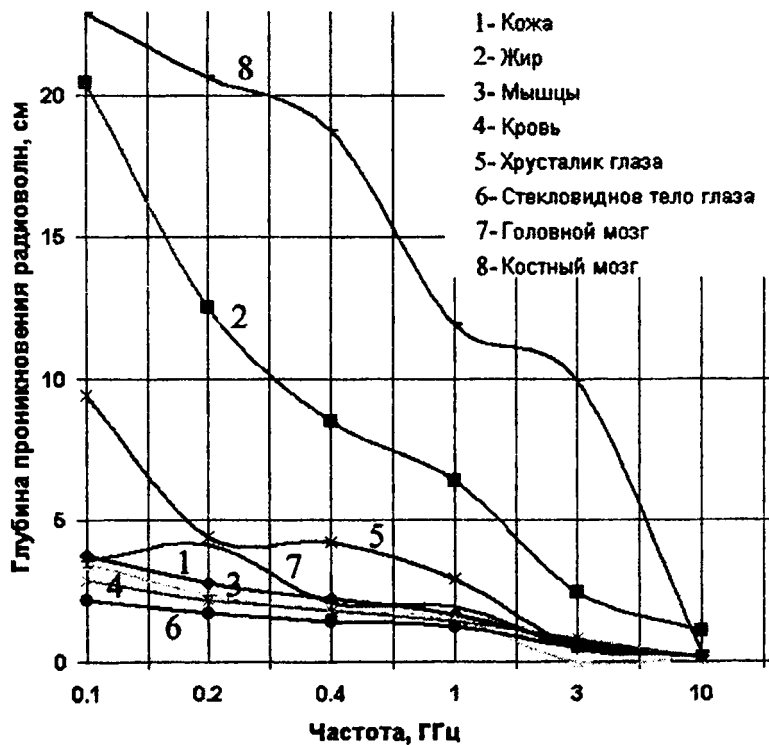


Рис. 1. Глубина проникновения электромагнитных волн в различные биоткани

Основным источником порождения электромагнитного излучения в мобильном телефоне являются его антенна, которая при разговоре находится в среднем на расстоянии 3 см от головного мозга человека и мало смещается при каждом использовании телефоном, а также многослойные матричные структуры микросхем, которые генерируют излучение высокой интенсивности. Воздействие полей мобильных телефонов проявляется даже на расстоянии полуметра и больше, происходит в так называемой ближней зоне поля, где электромагнитная волна квазистатическая, еще не сформирована, быстро убывает с расстоянием, поэтому в данном случае мозг человека выступает в качестве приемо-передающей антенны и участвует в формировании электромагнитного сигнала мобильного телефона. В результате становится возможным использовать мобильный телефон в качестве бесконтактного устройства регистрации мозговых волн при различных функциональных и когнитивных состояниях человека, так как при воздействии электромагнитных полей за счет вызванного резонанса биосистемы организма и синхронной активности нейронов головного мозга происходит усиление (ослабление) интенсивности излучения мобильного телефона. Вычисленные значения изменения силы излучения мобильного телефона могут легко передаваться в режиме реального времени на обработку с последующими формированием решения о наличии определенных скрытых прогрессирующих изменений в организме или распознаванием мозговых кодов мыслительных процессов субъекта. Причем интеллектуальная система управления когнитивным сознанием человека путем самообучения должна определять функциональное состояние мозга до использования мобильного телефона, учитывая при этом возможные изменения мозговой активности при воздействии внешних электромагнитных полей. Кроме того, подобные системы позволят обеспечить в будущем возможность защищенной и быстрой передачи речевых образов без их непосредственно произношения на основе анализа данных мозговой активности [1]. Несмотря на то, что головной мозг экранирован черепной коробкой и имеет развитую кровеносную систему, все же частота и удельная поглощенная мощность электромагнитного излучения сильно оказывают влияние на работу нейронов мозга и биосистемы субъекта. Организм человека состоит из токопроводящих тканей и жидкостных биосред, которые выступают в качестве мощных резонаторов, диэлектриков с потерями и работают также наподобие антенн для частот 450 МГц – 3 ГГц.

Сверхвысокочастотная энергия, которая проникает в тело человека, формирует на его поверхности потенциал величиной до десятков вольт, частично отражается (кожа, пот, микropоры и др.) и поглощается внутренними слоями тканей до глубины 2-3 см в зависимости от их проводимости, плотности, а также от действующих среднеквадратических значений напряженности электрического поля в заданных точках (рис. 1). Интенсивность воздействия электромагнитного поля мобильного телефона мощностью 0,1-1 Вт, длина волны излучения и когнитивное состояние человека сильно влияют на температуру биоткани, на картину информационных образов крови, пота, слюны, слезной жидкости, мочи, лимфы и др., а также на другие клетки организма и на нейроны головного мозга [2]. Это возникает за счет работы окислительных процессов на клеточном уровне, изменения поверхностного натяжения биосреды, проницаемости клеточных мембран, реакций аминокислот, структур ДНК, регулирования защитных механизмов и иммунной системы организма, а также при формировании свободных радикалов. Повышенная восприимчивость биоинформационных сред организма (кровь, слюна, пот, слезы, моча и др.) может привести к возрастанию активности аутоиммунных процессов с установкой программы формирования антител против клеток и тканей собственного организма. Например, содержание нитритов в слюне является важным показателем формирования оксида азота, который участвует в регуляции функций легких и желудка, поэтому на основании этих изменений возможно распознавание функционально-метаболических сдвигов в организме при воздействии мобильного телефона [3,4]. Причем наибольший эффект будет происходить в тех местах, где возникает наибольшая площадь контакта с биосредой (кровь, ликвор, пот, моча и др.). Воздействуя на биосреду организма и головной мозг таким образом, чтобы обеспечить синхронизацию работы клеток, можно тем самым улучшить функциональное и когнитивное состояния субъекта, прогнозировать и подавлять диссинхронизацию нейронов и других клеток организма. В свою очередь это означает возможности управления когнитивным сознанием субъекта, бесконтактной регистрации мысленных кодов мозга и мгновенной передачи их в телекоммуникационных и компьютерных сетях.

Таблица 1 – Резонансные частоты клеток организма человека

Характеристика биосистемы	Резонансная частота функционирования, Гц
соматическая клетка	$2,39 \cdot 10^{12}$
ядро соматической клетки	$9,55 \cdot 10^{12}$
митохондрии из клетки печени	$3,18 \cdot 10^{13}$
геном клетки человека	$2,5 \cdot 10^{13}$
Окончание таблицы 2.1	
хромосома интерфазная	$7,5 \cdot 10^{11}$
хромосома метафазная	$1,5 \cdot 10^{13}$
молекула ДНК	$2,9 \cdot 10^9$
нуклеосома	$4,5 \cdot 10^{15}$
рибосома	$2,65 \cdot 10^{15}$
клеточные мембраны	$5 \cdot 10^{10}$
цитоскелет	10^{11}
белки	$10^{12} - 10^{13}$
глаза	6, 19, 40-100
кровь	0,05-0,06, 0,1-0,3, 80, 300
кишечник	2-4
брюшная полость	4-8
почки	6-8, 600-700
вирусы	450
микробы	350
печень	300-400
руки	2-5
позвоночник	6
электрический потенциал желудка и кишечника	3,8 – 4,6
дыхание	6,3 – 7,6
сердце	3,2 1-2, 4-6, 20, 700-800
вестибулярный аппарат	0,5-13
желудок	3,8 – 4,6
электрическая активность мышц	2,6 – 6,5
управляющие сигналы головного мозга	0,5 – 13
головной мозг	14-35

Все вещества, живые и неживые объекты непрерывно излучают электромагнитные волны. При этом организм человека как комплексная биосистема наиболее подвержен влиянию частот до $6 \cdot 10^{19}$ Гц и каждый момент времени обладает собственной резонансной частотой функционирования, которая изменяется в зависимости от активности клеточных структур, органов, мыслительных команд человека и когнитивной технологии его сознания, а также под влиянием излучения мобильного телефона особенно на базовой частоте порядка 1,8 ГГц (табл. 2.1) [1]. Поэтому десинхронизация работы групп нейронов постепенно приводит к соответствующим возникновениям в мозгу новых информационных и энергетических процессов на мик-

ро-наноуровне биосистемы. Неживые предметы имеют также свои собственные волновые характеристики, которые излучают определенный спектр колебаний, отличающийся от спектра живого мира. Например, любой продукт питания, который человек хочет съесть, возбуждает в его головном мозгу синхронную активность нейронов в определенном диапазоне частот, находящуюся в резонансе с функциональным состоянием субъекта в данный момент времени, что приводит к стремлению человека выбрать из большого разнообразия желаемый продукт. Воздействия резонансных частот мобильного телефона может привести как к нарушениям работы нервных клеток, так и, наоборот, способствовать повышению уровня их активности за счет усиления резонансных частот работы организма. При совпадении частот мобильных аппаратов с частотами естественной биоэлектрической активности головного мозга человека происходит возбуждение или подавление активности нейронных ансамблей, изменение когнитивных способностей и сознания человека, которые сильно зависят от времени реагирования в пространственных задачах рабочей памяти и продолжительности воздействия.

Поэтому мобильный телефон представляет собой не только средство бесконтактной регистрации мозговой активности, которое функционирует на основе резонанса внешних электромагнитных волн с частотными свойствами нервных клеток, но и выступает в качестве механизма для улучшения и управления когнитивным сознанием человека. Электромагнитные поля мобильного телефона при определенной интенсивности стимулируют синхронную активность нейронов мозга, возбуждают его функциональные участки, а, следовательно, улучшают память, так как высокочастотное электромагнитное излучение увеличивает выработку в мозгу белка ацетилхолина, повышает скорость и гибкость мышления человека.

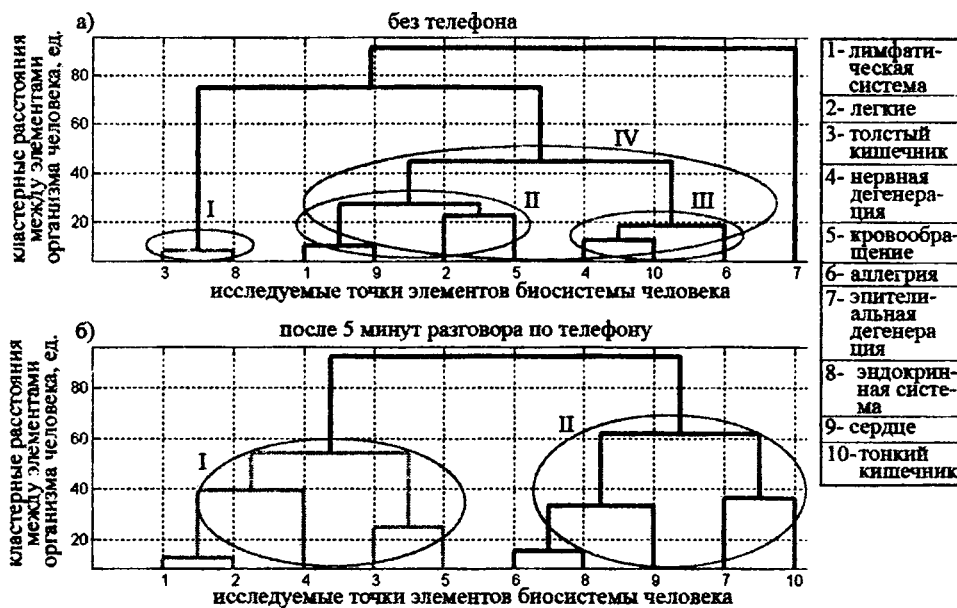


Рис. 2. Кластерное распределение элементов организма человека

Человек является сложной электромагнитной биосистемой, которая взаимодействует с окружающим миром и различными диапазонами частот энергоинформационного обмена клеток. На организм человека воздействуют атмосферные явления, переменные токи в проводниках, излучение молекул и атомов при тепловых, электрических воздействиях и под воздействием ускоренных заряженных частиц, ядерные и космические процессы, электромагнитные поля других объектов. Поэтому возможно и обратное воздействие мобильного устройства, когда оно приводит к десинхронизации ансамблей нервных клеток, сильному изменению спектра частот биоинформационных волновых процессов, что в результате ослабляет иммунную систему организма, внутренний ее баланс и делает человека незащищенным от влияний сторонних навязчивых мыслей, мозговых команд других субъектов и др. Взаимодействие внешней среды с биологическими объектами основано на том, что любая интеллектуальная система является открытой, и ее функционирование происходит в условиях непрерывного обмена с окружающей сре-

дой веществе, энергией и информацией. Поэтому любой биоинформационный образ реагирует на внешние воздействия электромагнитных полей, которые вызывают биологические эффекты в широком диапазоне амплитуд, частот и др. [5]. Эффект памяти волнового поля позволяет обнаружить любые протекающие изменения функциональности мозговых волн или, например, “ложные” мысленные команды асинхронной активности нейронов. Последствия воздействия любого внешнего источника электромагнитных волн, например, мобильного телефона наблюдаются еще некоторое время после его использования, поэтому большее число нейронов остается адаптированным к внешнему влиянию, а значит, человек способен только спустя некоторое время понять допущенные им ошибки. Все же включение дополнительных нейросетевых механизмов в мозг, корректирующих способы передачи данных между нейронными структурами, объясняет, как при воздействии сигналов, которые значительно превышают мозговые потенциалы, происходит обработка информации и распознавание сенсорных образов. Длительность воздействия электромагнитных частот мобильного телефона определяет степень синхронизации (десинхронизации) колебаний микро-наноструктур, поэтому после использования аппарата в мозгу формирует новая модель хаотического нейронного взаимодействия. Фоновые измерения по методу Фолля [6] с расчетом суммарного коэффициента отклонения показателей сопротивления кожи на рис. 2 показывают, что при пользовании мобильным телефоном биосистема человека обнаруживает заметные изменения коэффициента отклонения от нормы в определенных ее точках.

Большое значение на регистрацию мозговых волн, на улучшение когнитивных функций мозга или отдельных его участков оказывает также суточный ритм биоинформационных процессов при использовании человеком мобильного телефона, которые проявляют строго выраженный функциональный характер поведения, как показано в табл. 2 [1,2]. В мозгу происходят функциональные изменения, которые связаны с когнитивной функцией нейронных сетей, поэтому использование мобильных телефонов может быть эффективным с позицией улучшения сенсорного восприятия человека и активации его определенных участков мозга. Активность наших биосистем находится в определенном устойчивом резонансном состоянии, которое может изменяться как в процессе неконтролируемых человеком биофизических и биохимических взаимодействий клеточных структур, так и, например, при мыслительной активности во время разговора по мобильному телефону, а также под влиянием его электромагнитных полей в зависимости от различных экзогенных и эндогенных факторов. Это приводит к тому, что функциональность мозга, возможность регистрации мозговых волн, воздействие на когнитивные участки для их активации или подавления электромагнитных полей, а также для обеспечения безопасности жизнедеятельности человека заметно отличаются от временных и пространственных локализаций субъекта, использующего мобильный телефон.

Таблица 2 – Активность различных органов человека в течение суток

Биосистема	Часы максимума активности, ч	Часы минимума активности, ч
печень	1–3	13–15
легкие	3–5	15–17
желудок	7–9	19–21
селезенка	9–11	21–23
сердце	11–13	1–3
тонкая кишка	13–15	3–5
мочевой пузырь	15–17	5–7
почка	17–19	7–9

Электромагнитное воздействие мобильного телефона на биоинформационные жидкости человека наиболее заметно проявляется при анализе функциональности эритроцитов крови, взаимодействующих друг с другом через молекулы воды, которые представляют собой электрические диполи. При отсутствии влияния электромагнитных полей телефона сила взаимодействия эритроцитов незначительна, однако в присутствии внешнего излучения частотой 850 МГц увеличивается в десятки раз, что обусловлено выстраиванием и вращением диполей воды

при наложении внешнего поля в строго определенном направлении. Возрастание силы взаимодействия эритроцитов оказывает влияние на функциональность мозговых волн и формирование когнитивных способностей человека. Поскольку пиковая мощность излучения мобильного телефона существенно колеблется, что связано с конструктивными особенностями аппарата, его условиями эксплуатации, а также удаленностью субъекта от базовой станции, то обнаружение биоинформационных воздействий электромагнитных волн на биосреду организма достаточно сложно прогнозировать, но становится возможным при использовании интеллектуальных систем распознавания информационных образов твердых, жидких, газовых и гетерогенных сред. Например, ультрафиолетовое излучение с длиной волны 254 нм приводит к образованию в плазме и клетках крови свободнорадикальных реакций, которые приводят к активизации защитных функций организма на клеточном и гуморальном уровнях. Кроме того, воздействие мобильных телефонов наиболее сильно отражается также на состоянии нуклеинового обмена, поскольку наблюдается снижение количественного содержания мочевой кислоты при длине волны 289 нм в среднем с 0,56 ммоль/л до 0,32 ммоль/л, что подтверждает негативное влияние электромагнитных волн мобильного телефона на состояние нуклеинового обмена в организме человека, процесс распада и обновления клеток и др. [4, 7] Изменения в биоинформационной среде, вызванные воздействием электромагнитных полей мобильных телефонов, отражаются на генетической картине человека и приводят к функциональным ее изменениям, “останавливая или активируя” определенные гены человека [8].

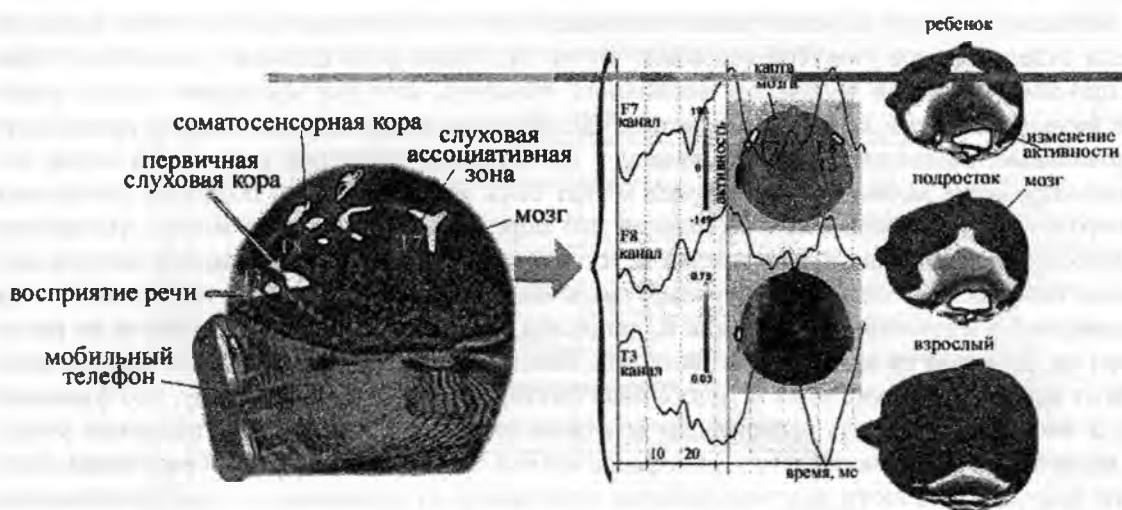


Рис. 3. Воздействие мобильного телефона на головной мозг человека

В основе функционального действия электромагнитных полей мобильных устройств связи на когнитивное сознание субъекта лежит поглощение энергии тканями, которое зависит от их биофизических параметров, например, диэлектрической проводимости. В связи с тем, что волны частот 300-3000 МГц поглощаются значительно сильнее в тканях, мобильные телефоны способны порождать токи проводимости во внутренних структурах и приводить к их нагреву. Электромагнитные поля с частотой ниже 1 МГц не вызывают значительного нагревания, а приводят к образованию электрических токов и полей в тканях. Частоты выше 10 ГГц поглощаются поверхностью кожи, и только очень незначительная часть энергии проникает в ниже расположенные биоткани, не вызывая при этом функциональные нарушения при напряженности поля не более 1000 Вт/м^2 . В диапазоне частот порядка 10 МГц-10 ГГц реакция биотканей на индукционный нагрев приводит к повышению их температуры более, чем на 10°C , и способна вызвать различные физиологические и терморегулярные изменения внутри структур головного мозга, которые к тому же заставляют биоинформационные жидкости человека (кровь, лимфа, ликвор и др.) сильнее осуществлять теплоотвод, так как под действием электромагнитного излучения нагреваются структуры мозга, ушная раковина, биоткани и др. Процесс поглощения электромагнитного излучения биоинформационной средой организма связан с преобразованием энергии излучения в тепловую с заметным нагревом тканей при напряженностях электро-

магнитного поля более 10 Вт/см^2 . В этом случае принято говорить об информационном воздействии, под которым понимают формирование биологического эффекта за счет энергии самого организма, в то время как внешнее воздействие дает лишь только толчок для развития данной реакции. Например, на протяжении получаса разговора по мобильному телефону температуры ткани ушной раковины и барабанной перепонки взрослого человека повышаются на один градус Цельсия, а изменения в крови и моче свидетельствуют о ранней степени заболеваний внутренних органов, о негативных изменениях в иммунной, эндокринной и центральной нервной системах. Поэтому мобильный телефон как маленькая микроволновка нагревает мозг и влияет на происходящие в нем процессы взаимодействия нервных клеток. Особенно сильно электромагнитному излучению подвержена кора головного мозга, которая воспринимает электромагнитные волны точно также как глаз – свет, а ухо – звук, и играет важную роль в осуществлении когнитивных функции человека. Однако применение специально разработанных нами интеллектуальных систем, способных регулировать интенсивность и продолжительность электромагнитного излучения, позволяет использовать мобильный телефон как устройство для активации нейронной активности в определенных участках мозга и устранения диссинхронизации отдельных групп нервных клеток в мозгу.

При воздействии мобильного телефона мозг реагирует на вмешательство в его функциональную работу, “сопротивляется” и включает механизм компенсации электромагнитных полей, так что нейронные сети формируют устойчивую сложноорганизованную оптимизированную биосистему. Воздействия мобильного телефона отражаются главным образом на сенсорных биосистемах организма и его головном мозге (рис. 3) [9].

Например, тормозной путь автомобиля до полной остановки при скорости движения 110 км/ч существенно зависит от состояния водителя, и выпивший водитель менее опасен, чем говорящий по телефону: водитель в нормальном состоянии (30 м), водитель, выпивший два бокала пива (35 м), водитель, говоривший по мобильному телефону с системой hands-free (39 м), водитель, говоривший по обычному мобильному телефону (45 м) [10]. Причем важную роль при воздействии на функциональное состояние человека оказывают низкочастотные сигналы порядка до 15 Гц , которые соответствуют определенным типам сенсорных помех и шумов, будь то питающая батарея (2 Гц), элементы микросхем, приводят к десинхронизации работы нейронов и улучшению/ухудшению работы сенсорных систем организма (вестибулярные, зрительные, слуховые и др.). Например, при использовании мобильного телефона мощностью $0,6 \text{ Вт}$ с рабочей частотой 900 МГц , удельная энергия поля в головном мозгу составляет порядка $120\text{-}230 \text{ мкВт/см}^2$ [5]. Поскольку мобильные телефоны осуществляют передачу информации фреймами продолжительностью $4,616 \text{ мс}$, то частота включения передатчика составляет порядка 217 Гц , тогда мощность, выделяемая при каждом импульсе, будет составлять $0,25 \text{ Вт}$. Поэтому в мозговых структурах при включенном мобильном телефоне формируются электрические потенциалы десятки милливольт и частотой, в несколько раз превышающей естественную мозговую активность в диапазоне частот $14\text{-}30 \text{ Гц}$. Высокочастотные компоненты тета-ритма способны входить в резонанс с нейронами в мозгу и активировать их функциональность для поддержания заданной мысленной команды и творческих способностей человека. Так как тактовая частота мозга составляет порядка 120 ТГц , то низкочастотные компоненты мобильных устройств оказывают угнетающее воздействие на когнитивные способности человека. В частности, вторая частота ($8,35 \text{ Гц}$), которую излучает мобильный телефон и представляет собой отражение образов когнитивного сознания человека, ухудшает функциональные способности личности, приводит к замедлению его реакции и гибкости мышления [11,12]. Мобильный телефон в режиме ожидания способен генерировать также частоту дельта-ритма (2 Гц), которая связана с работой сознания во время сна субъекта и снижает активность некоторых нейронов мозга, поэтому наблюдается заметная десинхронизация мозговых областей.

Таким образом, при использовании мобильного телефона возникает глобальная синхронизация мозговых процессов с установлением системной деятельности мозга, происходит перестройка всей суммарной ритмической активности, а также изменения активности нейронов особенно в теменно-височных областях, которые отвечают за кодирование визуальных, слуховых и осязательных информационных образов. Электромагнитное воздействие мобильного телефона в данных участках мозга связано с изменениями процессов приема, переработки и хра-

нении информации, поступающей от органов чувств, изменении представления об окружающем человеке мире и способностях распознавания информационных образов окружающих нас объектов. Одновременно при нахождении субъекта в электромагнитном поле мобильного телефона происходит увеличение в его мозгу альфа-активности в теменно-височной области, которая блокирует внимание и развитие когнитивных способностей человека. В этом случае наблюдается незначительное снижение кросскорреляции во всех участках мозга, особенно в области расположения мобильного телефона, а также в правой и левой лобной и височной областях. В каждом участке мозга наблюдается некоторое повышение частоты спектра, а смещение усиливающегося альфа-ритма в левую лобно-височную область связано с программированием, регуляцией и контролем когнитивной деятельности человека, обуславливается способностью нейронов мозга достичь первоначального функционального состояния. Воздействие мобильного телефона проявляется также падением частоты доминирующего ритма в мозгу и увеличением амплитуды в лобных его отделах. Возникновение десинхронизации нейронной активности в височных областях свидетельствует о временном подключении сохраненных образов в памяти для формирования нового информационного функционального состояния субъекта.

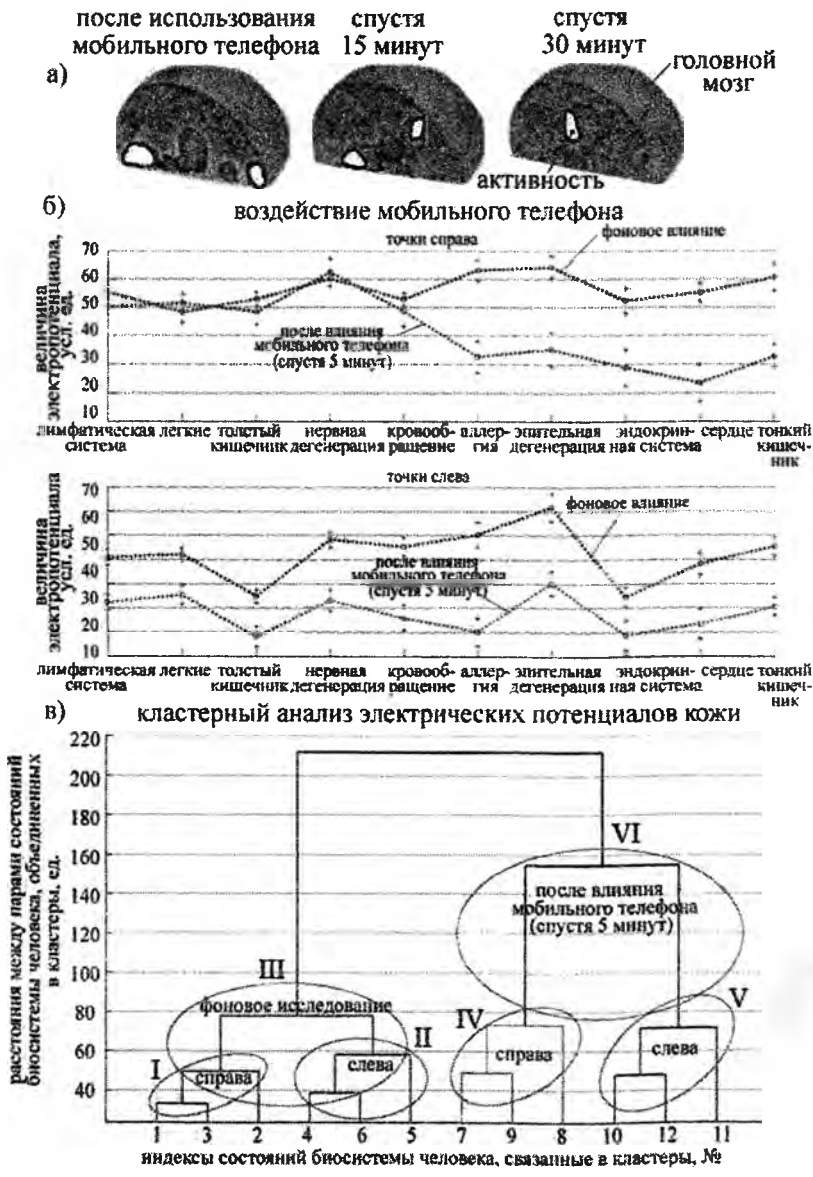


Рис. 4. Кластерный анализ электрических потенциалов кожи

Влияние мобильного телефона наиболее заметно проявляется при анализе электроэнцефалограммы (ЭЭГ) субъекта с помощью генератора немодулированного сигнала [9], который позволяет изучать воздействие электромагнитных полей даже спустя некоторое время после их воздействия. Регистрация сигнала ЭЭГ позволяет изучать сложное распределение информационных образов в пространстве головного мозга, однако является достаточно сложной задачей из-за возникающих помех в полученном сигнале и неэффективной фильтрации. При воздействии электромагнитного излучения на головной мозг происходит незначительное изменение спектра сигнала, что обусловлено быстрой синхронизацией нейронной активности к меняющимся внешним условиям. В результате на ЭЭГ не наблюдается изменений мозговой активности, сохраняются все сенсорные реакции и резонансные частоты организма. При использовании мобильного телефона происходит замыкание электромагнитного поля через глаза человека и его контакт с ликвором человека, что приводит к образованию локальных градиентных изменений динамики биосреды и образованию периодической медленноволновой активности с повышенной частотой спектра. В области максимальной напряженности высокочастотного поля в отведениях ЭЭГ максимальная спектральная плотность мощности приходится на частоты 2,5-6 Гц.

При включенном мобильном телефоне спустя порядка 15 секунд в организме происходят едва заметные изменения, которые через 40 секунд становятся более очевидны из-за резонанса частот (8 и 2 Гц) мобильного аппарата с микро-наноструктурами организма и повышения медианных частот спектра, которые непосредственно примыкают к антенне мобильного телефона. Хотя возникающая в контралатеральных участках мозга медленноволновая активность быстро исчезает, однако в результате воздействия сверхвысокочастотного электромагнитного поля происходит изменение функций клеток, а в дальнейшем и когнитивного сознания субъекта. Далее мозговая активность стабилизируется, впрочем медленноволновая компонента продолжает периодически возникать в одних и тех же участках мозга каждые 20 секунд. При выключении мобильного телефона она больше не проявляет себя, в то время как сенсорные влияния и присутствующие артефакты в биосигнале сильнее выражены. На рис. 4,а показано уменьшение выраженности локальных изменений ЭЭГ после окончания действия мобильного телефона. На основании представленных изменений мозговой активности очевидно, что последствия высокочастотного поля мобильного телефона проявляются еще довольно длительное время, что говорит о воздействии высокочастотного поля мобильного телефона на спонтанную электрическую активность мозга (рис. 4) [6, 9]. Причем характер этого воздействия свидетельствует об усилении магнитными полями синхронной нейронной активности в сенсорных областях мозга и в симметричных им участках. После прекращения использования мобильного телефона происходит усиление волн альфа-диапазона биоэлектрической активности головного мозга, причем возбужденные участки головного мозга остаются активными еще около получаса.

Таким образом, трехмерная реконструкция выраженных изменений высокочастотного поля в головном мозгу в точках максимальной напряженности поля позволяет оценить воздействия мобильного телефона на головной мозг человека. Проявление эхо-эффекта в симметричных областях мозга обусловлено сильной синхронизацией отдельных групп нейронных ансамблей, которые отвечают за работу сенсорных систем организма. Повторяющиеся воздействия магнитных полей постепенно приводят к локальным изменениям синхронной активности нейронов, заставляют мозг работать интенсивнее, причем амплитудно-импульсно-модулированные сверхвысокие частоты мобильного телефона способствуют вынужденной адаптации мозга, с которой человек встречался достаточно редко, и при длительном влиянии приводят к значительным функциональным изменениям. Недостатки данных подходов заключаются в невозможности точного представления ЭЭГ в режиме реального времени, требуется экранировать мозговые волны и поля мобильных телефонов. Поэтому изменения на ЭЭГ не исчезают длительное время даже после окончания разговора, а затухают нелинейно с формированием эхо-акустических образов и продолжающимся делением клеток микроорганизмов и биосреды человека [13]. В этой связи мозг человека наиболее сильно подвержен скрытому перехвату мыслительных процессов человека, поэтому для поддержания синхронной работы нейронов и защиты биосистемы человека от внешнего воздействия применяются активные и пассивные методы защиты от электромагнитных излучений, экранирующие, поглощающие, гармонизирующие электромагнитные экраны, выполненные из поглощающих материалов [14].

Обычно экранирования современных систем мобильной связи в диапазоне частот 453–1800 МГц на внутреннюю поверхность корпусов наносят защитные поглощающие экраны и одновременно проводят исследования электродинамических характеристик материалов. Однако такой вид защиты позволяет лишь на 8-10 дБ снизить уровень излучения, что является недостаточным для сверхвысоких частот (300 МГц - 300 ГГц), и излучение телефоном остается не полностью подавленным.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Колешко В.М., Воробей Е.А., Хмурович Н.А. Когнитивная технология сознания. Проблемы и подходы в 5-ти томах / Под общ. ред. В.М. Колешко. – Том 1: Управление объектами силой мысли. – Минск, 2009. – 48 усл. печ.л., усл. изд. л. 38 [Электронный ресурс] http://www.youtube.com/watch?v=_ULIFYnfwdo (06.04.2010). [2] Колешко В.М., Воробей Е.А., Хмурович Н.А. Когнитивная технология сознания. Проблемы и подходы в 5-ти томах / Под общ. ред. В.М. Колешко. – Том 2: Нанoeлектроника мозга. – Минск, 2009. – 37 усл. печ.л., усл. изд.л.28 [Электронный ресурс] http://www.youtube.com/watch?v=BDwwASz_OFI&feature=related (06.04.2010). [3] Пустовалова Л.М., Борисенко О.В. Исследование биохимических параметров слюны у лиц, подвергающихся влиянию электромагнитного излучения сотовых телефонов // *Фундаментальные исследования*. – № 9. – 2006. – С. 105-106. [4] Пустовалова Л.М., Загреба Н.Д, Кубракова М.Е. Влияние излучения сотовых телефонов на показатели нуклеинового обмена в слюне // *Фундаментальные исследования*. – № 9. – 2006 [Электронный ресурс] http://www.rae.ru/fs/pdf/2006/2006_09.pdf (06.04.2010). [5] Ковалева А.В. Влияние электромагнитных полей и излучений на биообъекты [Электронный ресурс] http://nbuv.gov.ua/e-journals/Arbeh/2009_1/09kavrib.pdf (06.04.2010). [6] Серов И.Н., Сысоев В.Н., Рыбина Л.А. и др. Воздействие изделий с фрактальной наноразмерной топологией на некоторые процессы жизнедеятельности и экологии человека // *Нанотехника*. – № 1. – апрель 2006. – С. 146-151. [7] Холмогоров В.Е. Действие оптического излучения на кровь. Фотомодификация свойств крови // II съезд биофизиков России. Тезисы. – М., 1999. [Электронный ресурс] <http://www.library.biophys.msu.ru/gettext?Serial=1832>. [8] Юрковская Е.С. Влияние терагерцового излучения на тонкопленочный препарат ДНК / Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам “Ломоносов-2008”. – М., 2008. – С. 31. [9] Крамаренко А.В. Сопоставление локальных изменений ЭЭГ с картой поля мобильного телефона [Электронный ресурс] http://tredex-company.com/article_show.php?id=24 (06.04.2010). [10] Савицкая Я.А., Паслен В.В. Влияние высокочастотных электромагнитных полей на организм человека // *Экология та ноосферология*. – 2009. – Т. 20. – № 1-2. – С. 38–43. [11] Колешко В.М., Фурунжиев Р.И. Интеллектуальная система инфразвуковой защиты от террористов // *Технические средства защиты информации: материалы докл.* – Мн., 29 мая – 2 июня 2006. – Мн., БГУИР, 2006. – С. 70–71. [12] Патент РБ на изобретение “Интеллектуальная система управления шумами” № 9814, опубл. бюл. № 5 от 30.10.2007 / В.М. Колешко, Р.И. Фурунжиев. [13] Сурков М.И., Сайфутдинова А.Р., Беликова С.С. Действие излучений мобильных телефонов на микроорганизмы. – 2006. [Электронный ресурс] <http://www.rae.ru/fs/pdf/2006/03/Surkov.pdf>. [14] Борботько Т.В., Колбун Н.В., Лыньков Л.М. Электромагнитные излучения средств телекоммуникаций: методы защиты, безопасность организма человека / Т.В. Борботько. – Мн.: Тонпик, 2004. – 80 с.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Любой объект имеет набор параметров, которые описывают его состояние пространстве, размерность которого равна количеству параметров объекта. Состояние объекта определяет значения этих параметров. Находясь в определенном состоянии, объект имеет уникальные значения параметров, характерные только для данного состояния. Если состояние объекта изменяется, то изменяются значения его параметров. Основываясь на этом утверждении, можно смело утверждать, что, зная значения параметров исследуемого объекта, можно однозначно определить его состояние в многомерном пространстве. Задача прогнозирования сводится к определению значений параметров объекта в будущем. Причем, необходимо знать все параметры объекта, которые однозначно опишут его состояние в многомерном пространстве в будущем.

Процесс прогнозирования начинается с изучения объекта: необходимо выявить его параметры, составить базу данных соответствий значений параметров и состояния объекта, выявить наиболее значимые параметры, которые вносят весомый вклад в изменение состояния объекта, подобрать математическую модель, которая будет описывать зависимость изменения состояния объекта в зависимости от изменения его параметров.

Классификация задач, решаемых ИИС (Интеллектуальная информационная система).

Интерпретация данных. Это одна из традиционных задач для экспертных систем. Под интерпретацией понимается процесс определения смысла данных, результаты которого должны быть согласованными и корректными. Обычно предусматривается многовариантный анализ данных.

Диагностика. Под диагностикой понимается процесс соотношения объекта с некоторым классом объектов и/или обнаружение неисправности в некоторой системе. Неисправность — это отклонение от нормы. Такая трактовка позволяет с единых теоретических позиций рассматривать и неисправность оборудования в технических системах, и заболевания живых организмов, и всевозможные природные аномалии. Важной спецификой является здесь необходимость понимания функциональной структуры («анатомии») диагностирующей системы.

Мониторинг. Основная задача мониторинга — непрерывная интерпретация данных в реальном масштабе времени и сигнализация о выходе тех или иных параметров за допустимые пределы. Главные проблемы — «пропуск» тревожной ситуации и инверсная задача «ложного» срабатывания. Сложность этих проблем в размытости симптомов тревожных ситуаций и необходимость учёта временного контекста.

Проектирование. Проектирование состоит в подготовке спецификаций на создание «объектов» с заранее определёнными свойствами. Под спецификацией понимается весь набор необходимых документов — чертёж, пояснительная записка и т.д. Основные проблемы здесь — получение чёткого структурного описания знаний об объекте и проблема «следа». Для организации эффективного проектирования и в ещё большей степени перепроектирования необходимо формировать не только сами проектные решения, но и мотивы их принятия. Таким образом, в задачах проектирования тесно связываются два основных процесса, выполняемых в рамках соответствующей ЭС: процесс вывода решения и процесс объяснения.

Прогнозирование. Прогнозирование позволяет предсказывать последствия некоторых событий или явлений на основании анализа имеющихся данных. Прогнозирующие

системы логически выводят вероятные следствия из заданных ситуаций. В прогнозирующей системе обычно используется параметрическая динамическая модель, в которой значения параметров «подгоняются» под заданную ситуацию. Выводимые из этой модели следствия составляют основу для прогнозов с вероятностными оценками.

Планирование. Под планированием понимается нахождение планов действий, относящихся к объектам, способным выполнять некоторые функции. В таких ЭС используются модели поведения реальных объектов с тем, чтобы логически вывести последствия планируемой деятельности.

Обучение. Под обучением понимается использование компьютера для обучения какой-то дисциплине или предмету. Системы обучения диагностируют ошибки при изучении какой-либо дисциплины с помощью ЭВМ и подсказывают правильные решения. Они аккумулируют знания о гипотетическом «ученике» и его характерных ошибках, затем в работе они способны диагностировать слабости в познаниях обучаемых и находить соответствующие средства для их ликвидации. Кроме того, они планируют акт общения с учеником в зависимости от успехов ученика с целью передачи знаний.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения — одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что, в случае успешного обучения, сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке.

Управление. Под управлением понимается функция организованной системы, поддерживающая определенный режим деятельности. Такого рода ЭС осуществляют управление поведением сложных систем в соответствии с заданными спецификациями.

Поддержка принятия решений. Поддержка принятия решения — это совокупность процедур, обеспечивающая лицо, принимающее решения, необходимой информацией и рекомендациями, облегчающие процесс принятия решения. Эти ЭС помогают специалистам выбрать и/или сформировать нужную альтернативу среди множества выборов при принятии ответственных решений.

В общем случае все системы, основанные на знаниях, можно подразделить на системы, решающие задачи анализа, и на системы, решающие задачи синтеза. Основное отличие задач анализа от задач синтеза заключается в том, что если в задачах анализа множество решений может быть перечислено и включено в систему, то в задачах синтеза множество решений потенциально не ограничено и строится из решений компонент или под-проблем. Задачами анализа являются: интерпретация данных, диагностика, поддержка принятия решения; к задачам синтеза относятся проектирование, планирование, управление. Комбинированные: обучение, мониторинг, прогнозирование. [1]

Изначально, объект исследования — это «черный ящик». На вход подаются внешние воздействия, а на выходе получаем новое состояние объекта. Опытным путем накапливается база данных соответствий вход-выход. При установлении некоторых связей изменения параметров объекта и его выходного состояния, модель «черный ящик» превращается в модель «серый ящик». Идеальным случаем будет модель «белый ящик», к которой нужно стремиться. Для анализа объекта или процесса могут применяться следующие модели: «белый», «черный» и «серый ящик» (таблица 1).

Модели «черный ящик» основаны на наличии экспериментальных или оперативных эксплуатационных данных и не требуют никакой априорной информации. Они достаточно хорошо изучены и просты для работы в реальном масштабе времени. В то же время такие модели должны регулярно обновляться с изменением эксплуатационных параметров.

На начальных стадиях исследований использовались модели «белый ящик» и «черный ящик». В то же время модели «белый ящик» не используют эксплуатационные данные, а модели «черный ящик» не учитывают известные основные закономерности процессов. Таким образом, возникает необходимость разработки новой технологии моделирования, основанной на принципах «серого ящика», которая позволяет проводить оперативный контроль над состоянием объекта. Структурная схема модели «серый ящик» показана на рисунке 1.

Таблица 1 – Сравнение свойств моделей «белый», «черный» и «серый ящик»

	«Белый ящик»	«Черный ящик»	«Серый ящик»
Источники информации	<ul style="list-style-type: none"> • Базовые физические законы • Понимание физики процессов 	<ul style="list-style-type: none"> • Эксперименты • Данные 	<ul style="list-style-type: none"> • Качественное знание процессов • Сочетание понимания физики процессов и наличия данных
Особенности	<ul style="list-style-type: none"> • Хорошая экстраполяция • Высокая надежность • Масштабируемость 	<ul style="list-style-type: none"> • Низкая стоимость разработки • Небольшая область знаний • Неясный механизм процессов 	могут быть различные комбинации свойств моделей «белый» и «черный ящик»
Недостатки	<ul style="list-style-type: none"> • Большие затраты времени • Требование обширных знаний 	<ul style="list-style-type: none"> • Нет надежной экстраполяции • Немасштабируемость • Требование достоверности и точности данных • Слабое понимание физики процессов 	могут быть различные комбинации свойств моделей «белый» и «черный ящик»
Области применения	<ul style="list-style-type: none"> • Планирование, разработка, конструирование • Достаточно простые и хорошо изученные процессы 	<ul style="list-style-type: none"> • Динамические и достаточно сложные процессы 	могут быть различные комбинации свойств моделей «белый» и «черный ящик»

Модель «серый ящик» в отличие от моделей «белый ящик» или «черный ящик», является сбалансированной системой, которая использует как априорное знание (физическое моделирование), так и опытные данные, полученные из анализа экспериментальных и эксплуатационных данных (идентификация системы). Модели «серый ящик» по своей сути являются компромиссом между сложностью модели «белый ящик» и возможностями модели «черный ящик» по прогнозированию процессов.



Рис. 1. Структурная схема моделирования по принципу «серый ящик»

Одним из существенных понятий в моделях «серый ящик» являются так называемые «базисные элементы», включающие имеющуюся информацию о поведении системы в виде простых аналитических функций и выражений. Вид этих элементарных функций увязывается с поведением системы. Базисные элементы могут иметь в модели системы разнообразные формы и подвергаться изменениям (мутациям). Например, в функции $\sin(x, c)$ параметры вектора c могут быть различными в разных ситуациях, в то время функция $\sin(x, c)$ может также подвергаться мутации и получить вид $\cos(x, c)$. Таким образом, путем комбинирования различных базисных элементов можно создать модель системы.

Можно считать, что технологии искусственного интеллекта, реализованные на основе модели «серый ящик», являются мощным инструментом для прогнозирования состояния объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Люгер Д., Искусственный интеллект, М.: Мир, 2003. 690 с.

УДК 612.821.8:331.46:331.47

*Колешко В.М., Гулай А.В., Воробей Е.А., Гаджинский Т.Т.,
Кукенов А.С., Мардас Д.В., Чашинский А.С.*

ПРОГРАММА WIS РАСПОЗНАВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБРАЗОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Большинство проблем в жизнедеятельности людей происходит в результате работы с техническими системами, что приводит в результате к возникновению аварийных и чрезвычайных ситуаций на производстве, причинению вреда здоровью и трудоспособности человека. При этом поведение человека является определяющим фактором в правильной эксплуатации устройств и устойчивости функционирования производственного процесса. Почти все виды чрезвычайных катастроф объясняют человеческим фактором. Для предотвращения внештатных ситуаций проводятся меры ужесточения чиновнического контроля, управления оборудованием и соблюдения правил охраны труда и техники безопасности персонала, которые, по сути, являются малоэффективными из-за неспособности раннего прогнозирования, предупреждения и исключения дальнейших печальных последствий халатности работающего и сбоев в работе технических систем. В течение последних десятилетий развитие интеллектуальных технологий способствовало решению многих важных технических и общечеловеческих задач эффективными, инновационными и надежными методами, которые находили широкое практическое использование в различных областях науки и производства. При этом основная цель создания «умных» технологий заключалась не только в облегчении жизнедеятельности человека, но и в возможностях раннего предотвращения и исключения заболеваний человека, производственных несчастных случаев, травматизма и особенно в распознавании по результатам контролирования работы автономной «интеллектуальной системы» организма человека безопасности экологического состояния производства и стопроцентной защите человека от вредных факторов производственной деятельности для достижения высокой промышленной безопасности. Это связано с тем, что ни одна умная система за исключением интеллектуальности функционирования организма человека не способна более эффективно контролировать промышленную и экологическую безопасность производства, что обуславливается высокой чувствительностью всех информационных биосред организма человека с максимально четким отражением малейших особенности изменений его состояния к протекающим изменениям в окружающей среде за счет слаженной работы его биосенсорных систем, а также влиянием в некоторой степени данных изменений на процесс нейроинформационного обмена в головном мозге. Это обуславливает возникновение различных видов заболеваний человека, функциональных нарушений в работе организма и возникновению необдуманных мысленных команд, что приводит к различным нарушениям техники безопасности, охраны труда и к возникновению аварийных случаев на производстве. Биоинформатика человека и живых организмов

позволила приблизиться к пониманию решения проблем существования человека с точки зрения анализа его генетических характеристик и признаков. Поэтому даже любые негативные мысли, которые возникают у человека при совершении противоправных поступков, например, при пренебрежении техникой безопасности, хищения и причинения вреда персоналу или оборудованию искажают картину биоинформационных образов биосреды организма (кровь, слюна, пот, слеза, моча и другие биопризнаки), что позволяет повысить безопасность предприятия с позиций распознавания воровства, намеренного вывода из строя оборудования и одновременно сократить промышленный травматизм по причине пьянства и халатности [1-5].

Разработанный нами аппаратно-программный комплекс распознавания информационных образов "WIS" выступает в качестве биосенсорной экспресс-диагностической лаборатории для широких задач как индивидуального использования, так и применения в промышленной биотехнологии, медицине, экологии, пищевой промышленности, обороне и национальной безопасности и основывается на использовании оптической широкополосной микротомографии "Крот" с анализом оптических свойств газовых, жидких и гетерогенных сред. Количественная оценка показателей спектральных характеристик отражения (коэффициенты поглощения, преломления, рассеивания, изменения градиента, отражения, поляризации, а также изменение интенсивности, амплитуды, фазы электромагнитной волны и пространственно-временного распределения поля), например, крови, слюны, пота, мочи и других биоинформационных сред в частотном диапазоне $10^{11} - 10^{15}$ Гц в реальном времени позволяет быстро и неинвазивно идентифицировать количественный концентрационный состав биохимических образов компонентов сложных веществ, например, для крови это гемоглобин, эритроциты, моноциты, общий билирубин, белок и другие биохимические показатели, сравнить их с эталонными моделями веществ и определить степень выраженности характерного распознаваемого образа, например, заболеваний сердечнососудистой системы и дыхательных путей. Тем самым обеспечивается наиболее эффективное обнаружение явной зависимости молекулярных особенностей биоинформационных образов среды организма человека в зависимости от степени выраженности характерного заболевания человека на ранней его стадии проявления. На рис. 1 показана схема действия оптического широкополосного микротомографа "Крот", где посредством микросветодиодов происходит испускание заданных электромагнитных волн в диапазоне частот $10^{11} - 10^{15}$ Гц, а микрофотодиоды регистрируют количественное изменение отраженного излучения (коэффициенты поглощения, преломления, рассеивания и другие показатели).

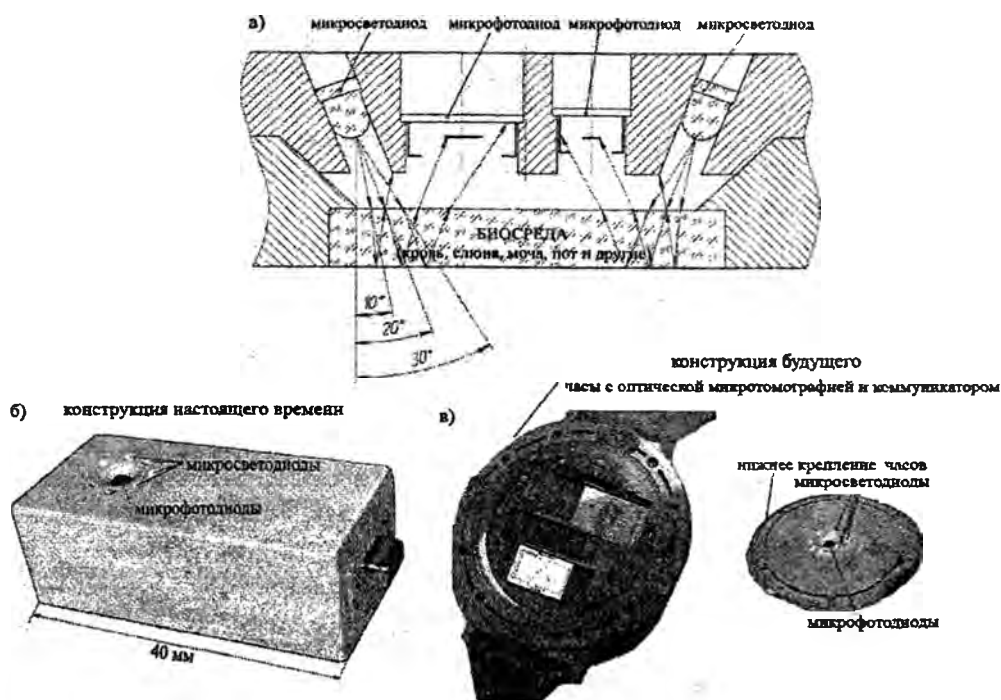


Рис. 1. Схема анализа биосред оптической широкополосной микротомографией (а), современный общий вид (б) и программная среда WIS в умных часах с оптическим распознаванием образов (в)

На основании вышеуказанных предположений результаты молекулярных особенностей, например, крови, слюны, пота, мочи и другие, получаемые с помощью характеристик оптических свойств биосреды, могут быть использованы в качестве входных данных при разработке программной интеллектуальной системы распознавания информационных образов для биосенсорной системы экспресс-диагностики.

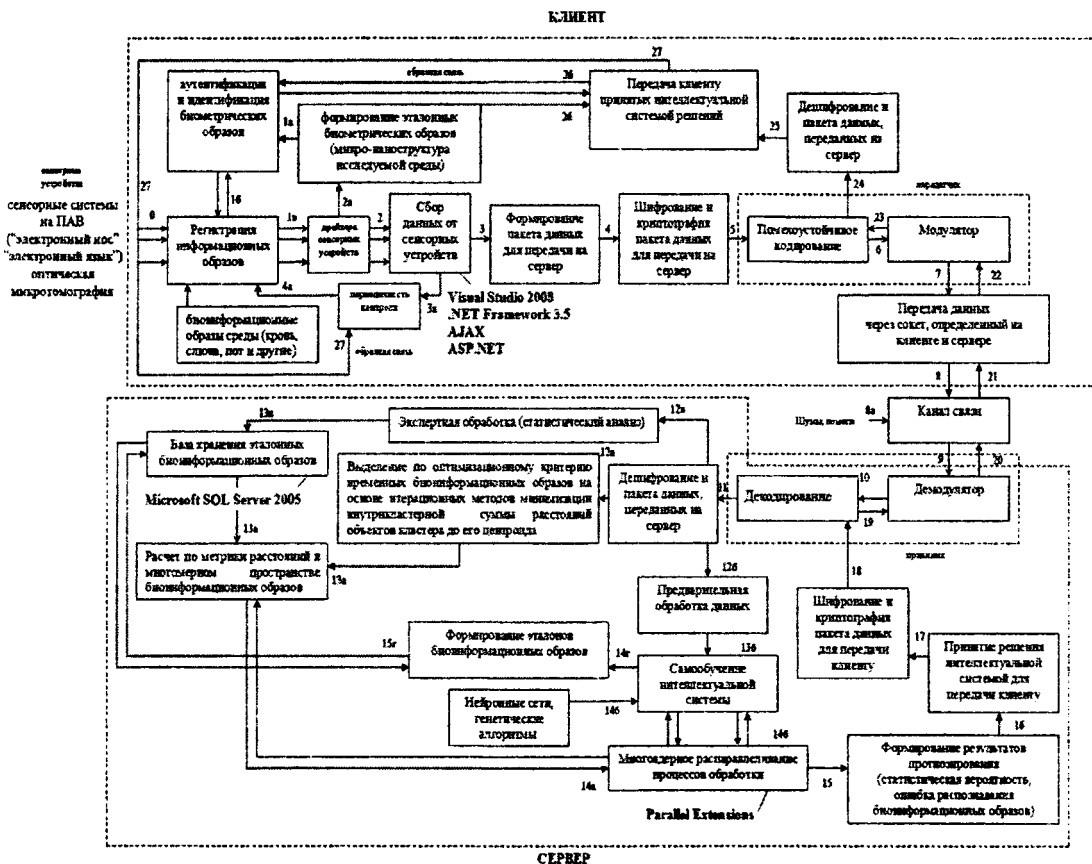


Рис. 2. Функциональная схема работы программы "WIS" с пошаговой обработкой

Стоит отметить, что в настоящее время работы в данной области уже ведутся некоторыми российскими и зарубежными учеными, которые анализируют лишь инфракрасную область спектра информационных образов биообъектов или определенные частотные диапазоны в видимой области, в частности 520-590 нм, с анализом коэффициентов отражения только от отдельных видов исследуемых признаков молекулярной биосреды, например, для эритроцитов крови, общего гемоглобина, общего белка, лейкоцитов, эритроцитов, тромбоцитов, мочевины, ретикуляцитов и других биохимических показателей. Некоторые работы указывают на возможность идентификации на основе биохимически программируемых наночипов ряд из минимума 32-ух протеинов в слюне, которые являются важным индикатором различных заболеваний организма человека, в частности, связанных с работой сердца. Неудивительно, что сильно возрастает интерес ученых к возможности обнаружения в результате метода просвечивания не слишком толстых биологических тканей факта присутствия в организме человека скрытой патологии. При этом значительные успехи при анализе данных биоинформационных образов связаны с применением различных методов микроскопии (флуоресцентной, конфокальной, многофотонной, ближнего поля, фазового и интерференционного контраста), среди которых следует выделить оптическую микроскопию и, в частности, микротомографию, являющейся современным перспективным направлением в микроскопии, открывающим потенциально новые возможности исследования внутренней структуры и параметров микрообъектов, например, клеток крови, пота, слюны, мочи и других биосред.

Интеллектуальность созданного программного продукта “WIS” заключается в эффективном выборе оптимального количества информационных образов измеряемой среды, например, крови, слюны, мочи, пота и других веществ биотехнологии во временном массиве их регистрации в режиме онлайн, быстрой и оптимальной обработке полученных информационных данных человека кластерными методами анализа, что позволяет избежать изменений картины анализов и обеспечить оперативность прогнозирования. При этом выбор оптимального количества информационных образов биосреды и соответствующим им входных переменных ее признаков из временной области пространства измерения осуществляется посредством поиска максимально возможного количества кластеров разбиения по вычисленному критерию оптимальности после предварительного преобразования данных, нахождения матрицы центроидов, квадратов расстояний каждого центроида до всех точек наблюдений и вычисления критерия оптимальности как отношение среднего расстояния между кластерами к среднему значению средних внутрикластерных расстояний [6]. Это означает своего рода распознавание количества наиболее сильно выраженных изменений функционального состояния человека, которые указывают на проявление определенной активности, бездействия человека или, что также возможно, соответствуют признакам возникновения в организме скрытого заболевания. Обнаружение только определенных информационных образов состояния организма во времени позволяет ускорить процесс последующей обработки данных, например, при распознавании факторов заболевания у человека при расчете расстояний по метрике Евклида в многомерном пространстве признаков биосреды (кровь, слюна, пот, моча и другие) между исследуемым вектором данных, отобранном на этапе отбора оптимального количества информационных образов изменения состояния человека, и эталонными значениями, сохраненными в базе данных SQL сервера и описывающих соответствующие заболевания и их отсутствие. В дальнейшем для всех эталонных кластеров проводится перемножение полученных значений расстояний в пространстве показателей биосреды, а также симптомов заболеваний, и затем расчет обратного значения. Окончательное прогнозирование патологий определяется делением каждого обратного числа на соответствующую сумму всех обратных значений, а ранжирование полученных вероятностей распознавания по возрастанию позволило установить процентную степень выраженности вероятности определенного заболевания, что в значительной степени позволяет избежать изменений клинической картины анализов и обеспечить оперативность прогнозирования на начальном этапе возникновения патологий в организме, а, следовательно, обеспечить высокий уровень экологической и промышленной безопасности [7].

Отличительной особенностью разработанной нами программного продукта “WIS” (рис. 2) является создание интеллектуальных клиентских приложений в Visual Studio 2008, что делает возможным наглядную быструю разработку подключенных приложений на разных платформах посредством быстрой работы с .NET Framework 3.5, использования библиотеки Parallel Extensions для ускорения процессов обработки данных в зависимости от количества доступных ядер в системе, SQL Server 2005 с предоставлением широких возможностей для создания Web-приложений, а также улучшенных методов быстрой кластерной обработки с эталонным сравнением и защита данных анализа, полученных результатов прогнозирования при передачи в коммуникационных и информационных сетях посредством помехоустойчивого кодирования, индивидуальной криптографической защиты и интеллектуальной суперзащиты личности от создания имитационных моделей и фальсификации биометрических характеристик.

С использованием оптической микротомографии с радиочастотной идентификацией [8-9] для снятия информативных характеристик жидких, газообразных и гетерогенных сред и последующей их передачи по защищенным каналам связи система с интеллектуальной параллельной микропроцессорной обработкой данных позволяет человеку в реальном времени получить полную картину его функционального состояния и одновременно предупредить факторы проявления характерного заболевания с выбором и контролем интеллектуальной системой стратегии оптимального выздоровления объекта, способна быстро идентифицировать биохимические образы сложных веществ, например, крови, пота, слюны, мочи и других биосред, получить анализы экологического состояния производства, технологических процессов, состояния здоровья человека, а также избежать задержек и неточностей при передаче образцов или результатов обработки программного обеспечения интеллектуальной системы “WIS” в дорогостоящую исследовательскую лабораторию или в базу данных для хранения по защищенным каналам связи с использованием

технологии суперзащиты биометрических данных объекта, т.е. индивидуальной совокупной биометрической криптографической защиты с аутентификацией личности по анализу микро-наноструктуры его информационного образа. Следовательно, разработанный программный продукт "WIS" детально реализует следующие функции:

- обеспечение новизны решения проблемы обеспечения экологической и промышленной безопасности на предприятии благодаря диагностированию функционального состояния трудящихся с анализом информационных образов их крови, слюны, пота, мочи и других биосред посредством использования технологий оптической микротомографии;
- достижение максимальной простоты и надежности широкой технологической, программной и практической реализации в среде приложений Visual Studio 2008 с использованием оптимизационных критериев для кластерных алгоритмов эталонного сравнения информационных образов, хранящихся в базе данных Microsoft SQL Server 2005, новых возможностей для создания современных приложений на разных платформах при подключении библиотеки Parallel Extensions для обеспечения высокой скорости обработки данных за счет распараллеливания процессов в зависимости от числа ядер в вычислительной системе и среды ASP.NET для поддержки многоязычных
- приложений Web- клиента;
- конфиденциальность, целостность хранения, обработки и передачи информации пользователей с помехоустойчивым кодированием, индивидуальной биометрической криптографической защитой биометрических признаков;
- удобства эксплуатации созданной экспресс-лаборатории "WIS" каждым желающим, поскольку интеллектуальная система работает полностью независимо и целиком освобождает человека от необходимости выполнения каких-либо действий по ее контролю, а аппаратная реализация может быть представлена, например, в виде часов или других мобильных устройств (мобильный телефон, Smartphone, Pocket PC и другие), а также в любом другом представлении, легко встраиваемого в произвольное устройство в зависимости от практических целей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Koleshko V. M. Acoustic – electronic phenomenon of a brain and principles of designing of machines and mechanisms // Col "The congress on theoretical and applied mechanics". – Minsk, 1996. – P 47 – 49.
2. Koleshko V. M. Acoustic – electronic phenomenon and electric activity of a brain of the person // International seminar "Transfer processes in biomedical problems". – Minsk, 1995. – P 17 – 19.
3. Колешко В.М., Воробей Е.А. Управление машинами силой мысли // Сборник материалов V международной научно-технической конференции "Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств", т. 3. – Новополоцк, ПГУ. – 2008. – С 37 – 41.
4. Колешко В.М., Воробей Е.А. Интеллектуальная система распознавания функциональности мозговых волн // Современные проблемы машиноведения: Тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции. – Гомель, Гом. гос. техн. унив. имени П.О. Сухого. – 2008. – С 101 – 102.
5. Колешко В.М., Воробей Е.А. Асинхронный интерфейс управления биомеханикой силой мысли // Межведомственный сборник научно-методических статей "Теоретическая и прикладная механика". – Вып. 24. – Мн. – 2009. – С 137 – 141.
6. Николенко С. Алгоритмы кластеризации // Машинное обучение. – ИТМО, 2006. – 33 с.
7. Колешко В.М., Воробей Е.А., Хмурович Н.В., Польшкова Е.В. Интеллектуальная система диагностики биохимических образов крови // Сборник второй международной научной конференции "Современные информационные и телемедицинские технологии для здравоохранения". – Мн. – 2008. – С 202-204.
8. Колешко В.М., Польшкова Е.В. Сенсорные микро-наносистемы с RFID идентификацией. – Сб. IV НПК "Нанотехнологии – производству 2007", г. Фрязино РФ, 28-30 ноября 2007. – С 97 – 100.
9. Колешко В.М., Польшкова Е.В., Паутино А.А. Сенсорные микро-системы с RFID идентификацией // Теоретическая и прикладная механика – Минск, 2005. – №22. – С 51 – 62.

САМООРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАБОТКЕ: АКУСТИЧЕСКИЙ СЕНСОРНЫЙ КОНТРОЛЬ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время в технологиях микросистем все шире применяются интенсивные методы обработки, в основу которых положено использование концентрированных источников энергии и вещества: лазерных, электронных, ионных, плазменных. При интенсивном воздействии на обрабатываемое изделие его поверхностный слой в короткое время поглощает значительное количество энергии, которая при аккумуляции образует в нем неравновесные диссипативные структуры. С течением времени данные структуры переходят в более устойчивое состояние термодинамического равновесия, при котором свободная энергия поверхностного слоя минимальна. Аккумулятивная структурами внутренняя энергия также уменьшается, а связанная энергия системы (представляющая собой произведение температуры на энтропию) возрастает. Происходящие при этом в поверхностном слое различные процессы самоорганизации (особенно при наложении их друг на друга), а также совместные воздействия внесенных и трансформированных потоков энергии и вещества ведут к образованию комплекса сложных структур.

Для изучения и понимания явлений самоорганизации в поверхностном слое при интенсивном воздействии на него в процессе обработки необходимо использование эффективных способов сенсорного контроля. Одним из таких способов служит измерение акустических колебаний, источником которых являются физические эффекты, сопровождающие выброс расплавленного материала из кратера, а также процессы в парогазовом канале над кратером. Возбуждаемые акустические колебания имеют широкий спектр частот, а их спектральная плотность зависит от параметров высокоэнергетического воздействия. Прием акустических колебаний производится с помощью пьезоэлектрического преобразователя, спектральная характеристика которого имеет достаточно сложную зависимость от частоты. В связи с вышеизложенным представляют интерес результаты исследования частотных характеристик пьезопреобразователя в режиме приема шумоподобных акустических колебаний. Высокую значимость имеет также решение задачи создания и изучения метода контроля самоорганизационных процессов путем установления корреляции между параметрами акустических сигналов и характеристикой поверхностных явлений при высокоэнергетической обработке.

Прием шумоподобных акустических колебаний пьезопреобразователем: анализ его спектральной характеристики. Выполнен расчет акустоэлектрических параметров плоского пьезоэлемента, наиболее часто используемого в сенсорном контроле акустических колебаний. При анализе работы плоского пьезопреобразователя в режиме приема шумовых акустических колебаний считается, что данные колебания, распространяющиеся в контролируемом образце, действуют только на одно из оснований пьезоэлемента ($z = 0$). Для установления распределения механического смещения по толщине пьезоэлемента решалось волновое уравнение

$$\rho \partial^2 \xi_z(z, t) / \partial t^2 = \bar{\mu} \partial^2 \xi_z(z, t) / \partial z^2 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\left. \begin{aligned} \xi_z(z, t) |_{z=0} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \Xi_z(0, \omega) e^{j\omega t} d\omega, \\ (\partial \xi_z(z, t) / \partial z) |_{z=d} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где ρ — плотность материала; $\bar{\mu} = \mu + j\omega\eta$ — эффективный модуль упругости среды с потерями; η — эффективная вязкость среды; $\xi_z(z, t)$ — механическое смещение пьезоэлемента вдоль координаты z , перпендикулярной плоскости пьезоэлемента; t — время; d — толщина пьезоэлемента; ω — частота. Здесь $\Xi_z(0, \omega)$ — функция спектра Фурье возникающего механического смещения основания пьезоэлемента, удовлетворяющая условию:

$$\langle \Xi_z^*(0, \omega) \Xi_z(0, \omega') \rangle = S_{\xi_z}(0, \omega) \delta(\omega - \omega'), \quad (3)$$

$S_{\xi_z}(0, \omega)$ — спектральная плотность механического смещения основания пьезоэлемента.

Решение волнового уравнения (1) позволяет установить распределение спектральной плотности механического смещения по толщине пьезоэлемента в режиме приема:

$$S_{\xi_z}(z, \omega) = C[\cos^2(k(z-d)) + \text{sh}^2(\alpha(z-d))], \quad (4)$$

где $C = S_{\xi_z}(0, \omega) / [(\cos^2(kd) + \text{sh}^2(\alpha d))]$. Без учета акустических потерь в материале пьезоэлемента выражение (4) имеет вид:

$$S_{\xi_z}(z, \omega)|_{\alpha=0} = D \cos^2(k(z-d)), \quad (5)$$

где $D = S_{\xi_z}(0, \omega) / \cos^2(kd)$.

Рассчитаем электрическое напряжение $U(t)$, возникающее на электродах пьезоэлемента в первоначальный момент после воздействия на одно из его оснований акустических колебаний образца. Для этого используем уравнение пьезоэффекта для одномерного случая:

$$E_z(z, t) = \varepsilon_0 \varepsilon D_z(z, t) - h_{33} \sigma_z(z, t), \quad (6)$$

где $E_z(z, t)$ — компонента напряженности возбуждаемого электрического поля вдоль координаты z ; $D_z(z, t)$ — компонента электрического смещения вдоль координаты z ; ε — относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 — электрическая постоянная; h_{33} — пьезо-константа. Учитывая, что $D_z(z, t)$ равно поверхностной плотности свободных зарядов, а за счет пьезоэффекта на электродах преобразователя возникают связанные заряды, в данном случае принимаем $D_z(z, t) = 0$. Проинтегрировав уравнение (6) по z от 0 до d , получим выражение для определения электрического напряжения на электродах пьезоэлемента:

$$U(t) = h_{33} [\xi_z(z, t)|_{z=d} - \xi_z(z, t)|_{z=0}]. \quad (7)$$

Переходя к спектральной плотности электрического напряжения, получим:

$$S_u(\omega) = Ch_{33}^2 (\text{ch}(\alpha d) - \cos(kd))^2, \quad (8)$$

или без учета акустических потерь:

$$S_u(\omega)|_{\alpha=0} = 4Dh_{33}^2 \sin^4(kd/2). \quad (9)$$

Как источник электрических сигналов пьезоэлектрический сенсор в режиме приема аналогичен конденсатору, емкость которого равна емкости заторможенного пьезоэлемента \tilde{N}_0 .

Учитывая это, можно найти ток $J(t) = \dot{N}_0 \partial U(t) / \partial t$, а также спектральную плотность тока $S_J(\omega)$, протекающего через пьезопреобразователь в режиме короткого замыкания:

$$S_J(\omega) = -Ch_{33}^2 \omega^2 (\operatorname{ch}(\alpha d) - \cos(kd))^2. \quad (10)$$

Без учета потерь выражение (10) упрощается:

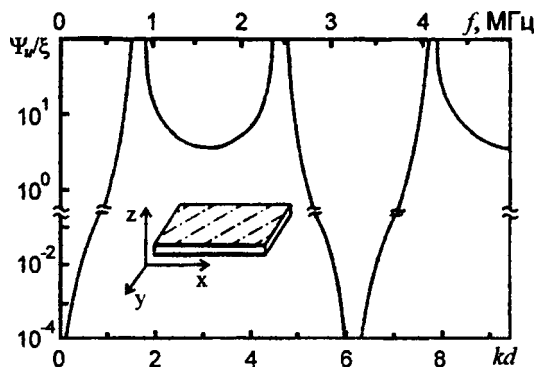


Рис. 1. Зависимость коэффициента трансформации спектра пьезоэлектрического сенсора от частоты колебаний.

$$S_J(\omega)|_{\alpha=0} = -4Dh_{33}^2 \omega^2 \sin^4(kd/2). \quad (11)$$

С целью анализа эффективности приема широкополосных акустических колебаний определим коэффициент трансформации спектра, равный отношению спектральной плотности электрического напряжения, возникающего на электродах, к спектральной плотности колебательного смещения основания пьезоэлемента:

$$\psi_{u/\xi} = S_u(\omega) / S_{\xi z}(0, \omega) h_{33}^2. \quad (12)$$

Подставив в (12) значение $S_u(\omega)$ из (8), получим:

$$\psi_{u/\xi} = [(\operatorname{ch}(\alpha d) - \cos(kd))^2] / [\cos^2(kd) + \operatorname{sh}^2(\alpha d)], \quad (13)$$

или без учета акустических потерь:

$$\psi_{u/\xi}|_{\alpha=0} = 4 \sin^4(kd/2) / \cos^2(kd). \quad (14)$$

Результаты расчета значений $\psi_{u/\xi}$ при разных kd для случая $\alpha = 0$ приведены на рис. 1, здесь же показана дополнительная шкала частот для конкретных параметров пьезоэлемента (ЦТС-19; $\bar{n} \approx 3,3 \cdot 10^3$ м/с; $d = 0,001$ м). Эффективность приема пьезопреобразователем акустических колебаний широкого спектра частот максимальна вблизи значений $kd = (2n-1)\pi/2$, которые соответствуют частотам $f_n = c(2n-1)/4d$. Для пьезоэлемента, рассматриваемого в качестве примера, эти частоты составляют 0,82; 2,47; 4,11, ... МГц.

Акустический контроль процесса самоорганизации поверхностных явлений при электронной обработке. В данном случае при постановке задачи по созданию метода акустического сенсорного контроля процесса электронной обработки учитывается сравнительно высокая сложность контролируемого объекта. Так, контролю подлежит относительно небольшой объем обрабатываемого электронным лучом материала – порядка 10 мм^3 . В указанном объеме обрабатываемого материала имеет место высокая концентрация энергии электронного потока – до 100 кВт. Далее, зона обработки как объект сенсорного контроля характеризуется наличием

твердой, жидкой и паровой фазы, а также непрерывными межфазовыми превращениями. Существенной особенностью, принимаемой во внимание всеми исследователями, является наличие турбулентного движения расплава в канале электронного воздействия. В свою очередь турбулентные перемещения материала порождают хаотические колебания в потоках квантов энергии и облаках микрочастиц, покидающих зону электронно-лучевой обработки. Анализ рассматриваемых физических процессов позволяет объяснить повышенный интерес к изучению частотного спектра акустических колебаний, возбуждаемых указанными потоками.

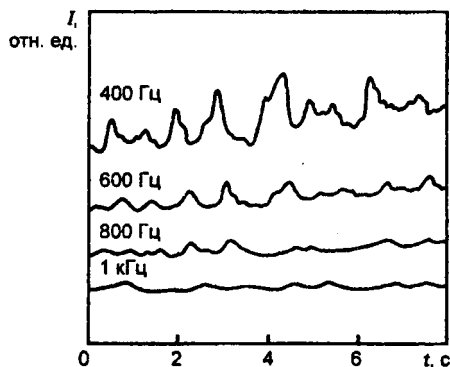


Рис. 2. Временное изменение выходного сигнала пьезопреобразователя в зависимости от частоты измерения.

Выполнялось изучение количественных зависимостей между параметрами акустических колебаний и геометрическими характеристиками продольного шва на поверхности экспериментальных образцов. Измерялся электрический сигнал с выхода плоского акустоэлектрического преобразователя из пьезокерамики ЦТС-19, помещаемого на поверхность экспериментальных образцов из конструкционной стали и алюминия. Указанные образцы подвергались обработке электронным лучом на установке EVS6015 Leybold Heraeus с параметрами $U_a=60$ кВ, $I_d \sim 40-60$ мА при скорости перемещения образца порядка 600 мм/мин. Размеры образцов составляли: длина – 200 мм, толщина – 20 мм; глубина проплавления при варьировании режимов обработки изменялась в пределах 2-20 мм. Электрические сигналы с выхода пьезопреобразователя записывались на магнитный носитель, а затем их параметры исследовались с помощью анализатора спектра. Спектральная плотность измерялась в частотном диапазоне от 0.2 до 600 кГц, ширина полосы сканирования составляла 400 Гц. Изменение выходного сигнала пьезопреобразователя со временем в зависимости от частоты измерения показано на рис. 2. На частотах ниже 1 кГц наблюдается ярко выраженное наложение инфразвуковых колебаний на измеряемый сигнал, причем инфразвуковая модуляция сигнала усиливается с понижением частоты наблюдения. Уменьшение амплитуды низкочастотных пульсаций и сглаживание временной зависимости выходного сигнала на частотах выше 1 кГц наблюдалось во всех опытах.

Наблюдается также взаимосвязь между амплитудой низкочастотных вариаций измеряемого сигнала и высотой рельефа продольного шлифа зоны обработки. Данный рельеф формируется при затвердевании жидкого металла, выбрасываемого из кратера в зоне электронной обработки. В предположении линейной регрессии между пульсациями рассматриваемых величин определяли коэффициент их корреляции, который в зависимости от выбора начальной точки сопоставляемых функций находится в пределах от 0,52 до 0,68. Предположение линейной регрессии оправдывается наилучшим образом при условии, когда акустический сигнал опережает сопоставляемую с ним точку профиля шва примерно на 250 мсек. Введение данного условия физически правдоподобно, так как продвижение теплового фронта при остывании металла после энергетического воздействия происходит медленнее, чем распространяются акустические колебания от зоны обработки.

С учетом обнаруженной взаимосвязи акустического сигнала с геометрическими параметрами шва проведена совместная обработка функций амплитуды изменения данного сигнала и высоты поверхности как временных рядов в предположении их стационарности и эргодичности. После высокочастотной фильтрации и дискретизации полученные данные обрабатывались с использованием компьютерной программы, позволяющей разделить запись сигналов на оп-

тимальные подинтервалы и провести сглаживание их краев. На следующем этапе обработки выполнялась быстрая Фурье-трансформация и грубая оценка спектра для каждого подинтервала. Затем производится приложение спектрального окна Гудмена и сглаживание по подинтервалам и, наконец, по частотам. В графической форме выводится значимая оценка спектра с высокой степенью свободы (более 30). Полученные указанным образом спектры при $U_a = 60$ кВ, $I_r \sim 60$ мА, скорости перемещения образца 600 мм/мин и неизменной фокусировке электронного луча представлены на рис. 3.

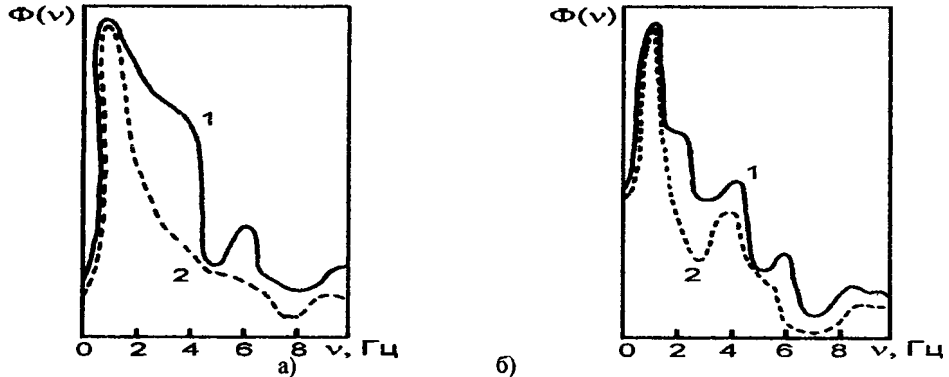


Рис. 3. Спектры функций, характеризующих изменение амплитуды акустического сигнала (кривые 1) и профиль шва (кривые 2) при электронной обработке стали (а) и алюминия (б)

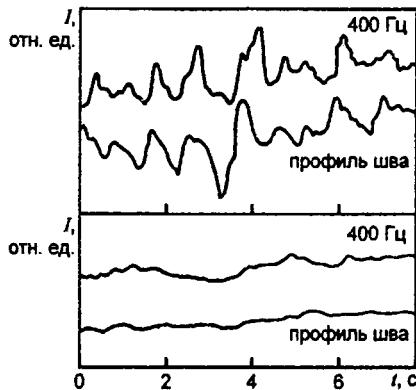


Рис. 4. Корреляция флуктуаций амплитуды акустических колебаний с изменениями профиля шва

Характерная особенность полученных зависимостей заключается в том, что для обоих обрабатываемых материалов мощность спектров имеет максимальное значение при частоте 1 Гц, при этом они демонстрируют высокую точность совпадения двух временных рядов. Это говорит о тесной причинной связи между процессом выбрасывания жидкого металла из кратера при электронно-лучевом воздействии и возникающими при этом акустическими колебаниями в образце. Взаимосвязь указанных процессов предопределяет высокую достоверность акустического сенсорного контроля явлений самоорганизации в зоне электронного воздействия. Наличие локального максимума на частоте порядка 6 кГц обусловлено вибрациями установки для электронно-лучевой обработки, которые порождаются ее движущимися частями и механизмами. Для примера на рис. 4 приведено изменение амплитуды акустических сигналов, полученных при электронно-лучевой обработке в двух режимах: при формировании шва с достаточно большими выбросами с частотой порядка 1 Гц (а); при образовании шва с мелкими и частыми чешуйками (б). В обоих случаях флуктуации амплитуды акустических колебаний низкой частоты хорошо коррелируют с изменениями величины выступов и впадин в профиле шва. Если учесть, что наличие различных дефектов шва, например, пор и пустот, связано с его профилем, то можно сделать вывод, что измерение акустических колебаний, параметры которых коррелируют с профилем шва, является эффективным методом сенсорного контроля качества электронной обработки.

**СЕНСОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ОКСИДОВ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ**

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Развитие технологии сенсорных наносистем требует использования принципиально новых материалов, сенсорные свойства которых определяются процессами, протекающими на атомном и молекулярном уровне, в нанослоях и нанобъемах. Когда толщины тонких пленок в сенсорных наноструктурах достигают размера нанoshкалы, происходит изменение фундаментальных свойств веществ, входящих в состав пленок. Из-за некомпенсированности связей поверхностных атомов наноразмерных частиц их свойства подобны атомным поверхностным свойствам кристаллов, обусловленным особенностями расположения их на границе раздела фаз, а также особенностями взаимодействия и движения атомов вблизи граней кристаллов. Указанные свойства наночастиц и нанопленок определяются, в частности, нарушением трансляционной симметрии кристаллической структуры, наличием меньшего числа соседних атомов, более сильной анизотропией и ангармонизмом колебаний.

Результат указанных явлений заключается в возрастании способности к адсорбции, ионному и атомному обмену, контактными взаимодействиям структурных элементов сенсорных наносистем. Следует отметить также, что в приведенных случаях осложняется интерпретация поведения наночастиц в сенсорных материалах из-за возникновения трудностей в разграничении их объемных и поверхностных свойств. Для решения поставленных задач в создании и изучении сенсорных наносистем на основе использования тонких диэлектрических пленок требуется применение эффективных методов моделирования физических свойств диэлектриков. Одним из продуктивных методов исследования диэлектриков как активных материалов сенсорики является компьютерное моделирование их электронных свойств и параметров элементарной ячейки (расчет параметров кристаллической структуры, определение позиции атомов в ячейке). Компьютерное моделирование позволяет прогнозировать характеристики синтезируемых сложных соединений, определять динамику изменения их параметров при введении микродобавок, оптимизировать состав материала для получения приемлемых свойств сенсорных наноструктур.

Анализ кристаллической структуры и физико-химических свойств редкоземельных элементов. В качестве активных диэлектрических материалов для квантовых сенсорных наносистем используются сверхтонкие пленки соединений (например, оксидов) редкоземельных элементов (РЗЭ) [1, 2]. Применение оксидов РЗЭ обусловлено их высокими адсорбционными свойствами, в частности повышенной адсорбцией к кислороду и водороду, что обеспечивает получение оптимальных характеристик сенсорных наноструктур. На основе тонких пленок редкоземельных оксидов сформированы и исследованы многослойные наноструктуры типа металл-диэлектрик-металл и металл-диэлектрик-полупроводник для сенсорных наносистем, в том числе для сенсоров контроля многокомпонентных газовых сред [3, 4].

Проведенный предварительный анализ атомно-структурных свойств редкоземельных элементов показал, в частности, что кривая изменения атомных объемов РЗЭ в зависимости от их порядковых номеров имеет отчетливо выраженный периодический ход. Указанная закономерность совершенно аналогична периодическому изменению валентности в группе редкоземельных элементов. Периодичность изменения атомных объемов, обусловленная аномально высокими значениями данного параметра для церия, празеодима, европия, самария, тербия и иттербия, свидетельствует о наличии в кристаллической решетке этих элементов ионов различного заряда.

Таким образом, кристаллические характеристики редкоземельных элементов наглядно демонстрируют, что тип кристаллической решетки зависит от заряда ионов, составляющих ее. При наличии двухвалентных ионов в кристаллической решетке металлический европий и иттербий кристаллизуются в виде объемно-центрированных и гранецентрированных кубов. Трехвалентные ио-

ны редкоземельных элементов образуют кристаллы с гексагональной упаковкой, исключая лантан, который кристаллизуется в гранецентрированных кубах. При одновременном появлении трех- и четырехвалентных ионов кристаллическая решетка РЗЭ принимает чаще форму гранецентрированного куба, чем гексагональную.

Гексагональная плотная упаковка редкоземельных элементов при достаточно высоких температурах превращается в кубическую плотную упаковку с тем же координационным числом. В соответствии с этим можно полагать, что всем редкоземельным элементам присуще наличие различных равновесных модификаций, существование которых находится в прямой зависимости от температурных условий. При увеличении порядкового номера элемента электронные оболочки K , L , а также подуровни s , p , d оболочки N заполняются в нормальной последовательности. Но затем она нарушается: вместо подуровня $4f$ заполняются $5s$ и $5p$, затем и $6s$ -подуровни; и только с церия начинается заполнение $4f$ -орбиталей. Однако вследствие энергетической близости $4f$ и $5d$ -орбиталей заполнение $4f$ -подуровня протекает нерегулярно — у церия, гадолиния и лютеция появляется по одному d -электрону.

При возбуждении атома лантаноида, что всегда имеет место при химическом взаимодействии, один из f -электронов (реже — два электрона) переходит в d -состояние. В результате f - d -перехода возникает конфигурация $5d^1 6s^2$, которая в основном и определяет химические свойства лантаноидов и их исключительное сходство. Этим объясняется и тот факт, что наиболее устойчивая степень окисления всех лантаноидов равна +3. Остальные $4f$ -электроны, экранированные от внешнего воздействия двумя электронными оболочками, на химические свойства лантаноидов оказывают значительно меньшее влияние.

Существенной является повышенная устойчивость электронных конфигураций $4f^0$, $4f^7$, $4f^{14}$; с ней связана вторичная периодичность в группе лантаноидов и относительная стабильность степеней окисления +2 и +4 в тех случаях, когда реализуются близкие к ним электронные конфигурации. Необычные степени окисления связаны с возможностью f - d -перехода, которая зависит от заселенности $4f$ -подуровня и качественно может быть оценена из рассмотрения зависимости разностей энергий состояний $f^{-1} d^1 s^2$ и $f s^2$. Положительные значения разности энергий характеризуют уменьшение вероятности f - d -перехода, и, следовательно, проявление степени окисления +2, отрицательные — свидетельствуют о большей вероятности таких переходов и степени окисления +4.

Программный пакет VASP/VAMP как среда моделирования электронных свойств оксидов РЗЭ. Результаты предварительного анализа электронных свойств редкоземельных элементов положены в основу компьютерного моделирования оксидов РЗЭ и интерпретации полученных данных. В качестве среды моделирования использован программный пакет VASP/VAMP, в котором реализуется ab-initio подход для квантовомеханических расчетов в молекулярной динамике (MD) на основе псевдопотенциалов с наборами базисных элементов плоских волн. Указанный подход, осуществляемый в VASP/VAMP, базируется на конечно-температурном приближении локальной плотности (со свободной энергией в качестве варьируемой величины) и точной оценке мгновенного электронного основного состояния в каждом MD-шаге.

Взаимодействие между ионами и электронами в используемом программном пакете описывается с помощью ультрамягких псевдопотенциалов Вандербиля (US-PP), или метода плоских присоединенных волн (PAW). Оба метода позволяют осуществлять значительное сокращение необходимого числа плоских волн в атомах переходных металлов. Кроме этого, в программе VASP/VAMP сравнительно просто рассчитываются силы и напряжения, которые возникают при релаксации атомов к их мгновенному основному состоянию.

Данная программа позволяет проследить за смещением отдельных частиц в изучаемой системе и вычислить коэффициенты их самодиффузии, рассчитать среднее время смены ближайших соседних частиц, а также определить ряд других физических свойств. Особенно привлекательным в исследовании активных сенсорных материалов является моделирование зависимостей указанных характеристик от температуры и величины механических напряжений в образце.

Задача моделирования атомно-структурных и электронных свойств редкоземельных соединений в наиболее общем виде заключается в выборе оптимальных алгоритмов расчета в программе VASP/VAMP, подборе входных параметров моделируемой системы для достижения требуемой точности расчетов и выборе определенной методики адекватного определения свойств изучаемых сенсорных материалов. Главная цель методов, используемых в VASP, состоит в решении уравнения

Шредингера для электронов в определенной структуре и оценке конечной полной энергии, сил и других параметров и величин. В данной работе использован метод присоединенных плоских волн (PAW-метод) VASP-программы, который позволяет корректно рассчитывать параметры кристаллической решетки, адекватно оценивать спиновую поляризацию и физические свойства материалов.

Идея применяемого алгоритма моделирования заключается в том, что расчет начинается с относительно малого числа атомов, а затем на основе полученных результатов с применением определенной методики производится трансляция до требуемых размеров структуры. Так, один из блоков алгоритма представляет собой модель структуры с малым числом атомов, в которой не учитывается температурная зависимость движения атомов, и расчет производится в объеме. В следующем блоке алгоритма полученные в результате расчета каждого отдельного слоя данные объединяются в одну систему. Далее выполняется удаление/добавление атомов для получения требуемого вида дефектов. На следующем этапе реализации алгоритма моделирования производится выбор процедуры по добавлению атомов в моделируемый массив. Например, если рассматривается точечный дефект (сферический), то усиление его влияния происходит по принципу увеличения размеров сферы. Предварительно выполняется ряд тестов, в частности производится расчет оптимального количества точек, устанавливающих степень разбиения обратного пространства, а также определяется минимальная энергия моделируемой системы. От количества указанных точек зависит точность определения координат атомов кристаллической решетки: для диэлектриков достаточно десяти точек на одну элементарную ячейку.

Атомно-структурные и электронные свойства оксидов редкоземельных элементов в объеме. В данной работе представлены результаты моделирования атомно-структурных и электронных свойств оксидов самария (Sm_2O_3) и гольмия (Ho_2O_3). Кристаллическая ОЦК решетка данных редкоземельных соединений показана на рис. 1, а параметры решетки этих соединений приведены в таблице 1. Для расчета зонной структуры определяется первая зона Бриллюэна кристаллической решетки. Первая зона Бриллюэна рассматривается в данном случае как элементарная ячейка обратной решетки, обладающая точечной симметрией этой решетки. Из этого, в частности, следует, что объем первой зоны Бриллюэна равен объему элементарной ячейки обратной решетки. Все зоны Бриллюэна являются репликами первой зоны: их получают, транслируя точки, принадлежащие первой зоне, на векторы обратной решетки. Отличие полученных при моделировании значений параметров зонной структуры от справочных величин связано с использованием определенных приближений при решении уравнения Шредингера.

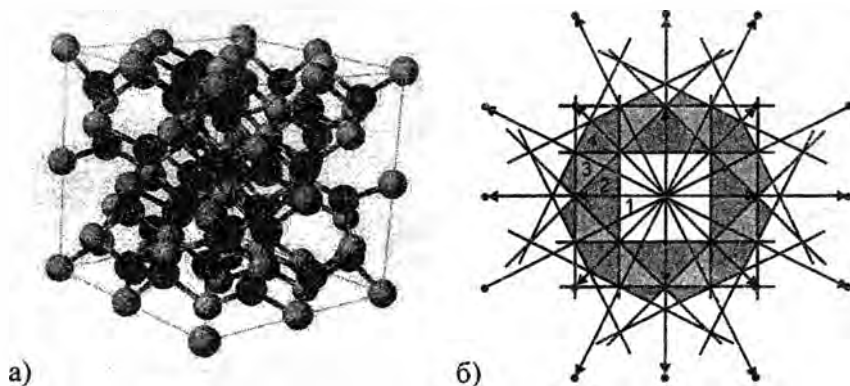


Рис. 1. Кристаллическая ОЦК решетка редкоземельных оксидов (а) и четыре зоны Бриллюэна для двумерной прямоугольной обратной решетки (б)

Таблица 1–Параметры кристаллической решетки редкоземельных оксидов

Оксид РЗЭ	Параметры решетки, Å			Запрещенная зона, эВ спр./мод.	Вид решетки	
	а, спр./мод.	б, спр./мод.	с, спр./мод.		Тип решетки	Простр. группа
Sm_2O_3	10,85/ 11,7180	10,85/ 11,7177	10,85/ 11,7111	5,1/4,9	ОЦК	Ia-3
Ho_2O_3	10,61/ 10,6153	10,61/ 10,6153	10,61/ 10,6153	5,3/3,85		

Электронная плотность для оксидов самария и гольмия представлена на рис. 2, а их зонная структура приведена на рис. 3. Полученные зависимости позволяют установить, что спиновая поляризация носителей заряда вблизи уровня Ферми составляет $[1+(\text{spin}_{\text{up}}-\text{spin}_{\text{down}})/(\text{spin}_{\text{up}}+\text{spin}_{\text{down}})]/2=0,4872$. Из вышеизложенного следует, что редкоземельные оксиды могут быть использованы в спинтронных сенсорных наноструктурах при получении туннельных барьеров (в наноструктурах типа ферромагнетик–диэлектрик–ферромагнетик) или при получении квантовых колодцев (в наноструктурах типа диэлектрик–проводник–диэлектрик).

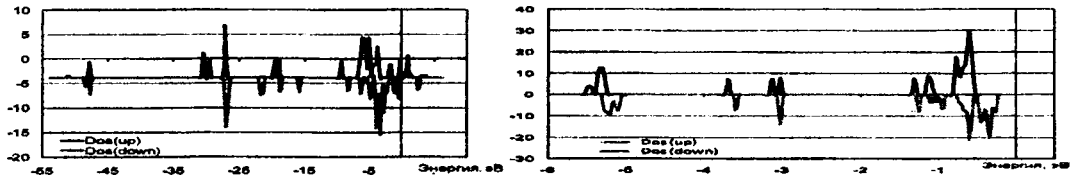


Рис. 2. Электронная плотность для оксида самария (а) и оксида гольмия (б)

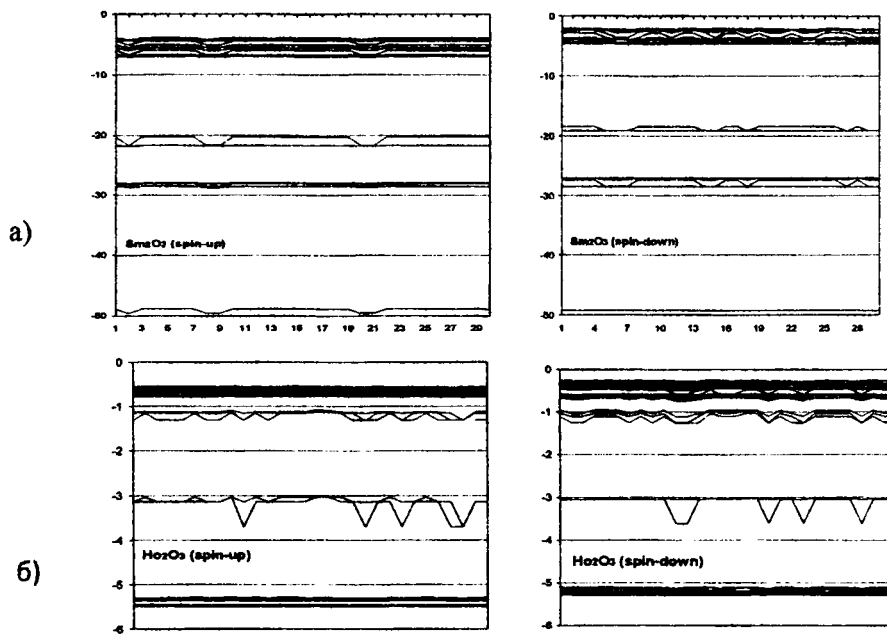


Рис. 3. Зонная структура оксида самария (а) и оксида гольмия (б)

Интегральное представление электронной плотности более наглядно отражает разницу в количестве электронов с разными спинами на подуровнях зоны проводимости и валентной зоны. Анализ зонной структуры редкоземельных оксидов позволяет высказать предположение, что для моделируемых материалов характерно наличие нескольких подуровней, которые замедляют релаксационные процессы. Вблизи зоны проводимости имеются ловушечные центры на расстоянии порядка 0,35 эВ (акцепторный уровень), а второй подуровень ловушечных центров относится к разряду глубоких уровней, что позволяет увеличить время жизни как электронов, так и дырок. В отличие от первого подуровня, на который могут переходить только электроны, на второй уровень равновероятен переход обоих носителей заряда.

Вид полученных волновых функций свидетельствует о низкой подвижности носителей заряда в исследуемых материалах. Ловушечные уровни в области собственной проводимости материалов приводит к сильной зависимости удельной проводимости от возможных примесей и дефектов в кристалле. В результате моделирования установлено, что заряды в кристалле редкоземельных оксидов обладают спиновой поляризацией. Запрещенная зона для электронов со

спином вверх имеет значение 4,5 эВ, а со спином вниз — 4,55 эВ. Наличие относительно малого числа носителей заряда вблизи уровня Ферми определяет особенности применения данных материалов в наносенсорике.

Электронные свойства редкоземельных оксидов при имитации ограничения кристаллической структуры. Особый интерес вызывает моделирование электронных свойств изучаемых материалов при имитации ограничения кристаллической структуры по одной из координатных осей. Данное представление приближает модель кристаллической решетки оксидов РЗЭ к реальной ситуации в технологии сенсорного контроля. Дело в том, что формирование сенсорных наноструктур предусматривает наличие свободной поверхности активного сенсорного материала для обеспечения взаимодействия ее с контролируемым газом.

Для изучения поверхностных свойств оксидов РЗЭ, в частности оксида самария, выполнена трансляция элементарной ячейки по осям X и Y для получения плоскости, а затем — по оси Z для получения необходимой кристаллической структуры. После этого для имитации поверхностных свойств принимаем, что определенное количество (в пределах 10–50%) связей в кристалле по оси Z разорвано. Поскольку для решения уравнения Шредингера в качестве одного из приближений программа VASP использует трансляцию электрофизических и атомно-структурных свойств, то во избежание взаимодействия атомов поверхности с нижним слоем добавлены атомы водорода, замыкающие свободные связи. Для имитации периодичности кристаллической решетки нижние слои «заморожены» — атомно-структурные и волновые функции для данных атомов условно приняты неизменными.

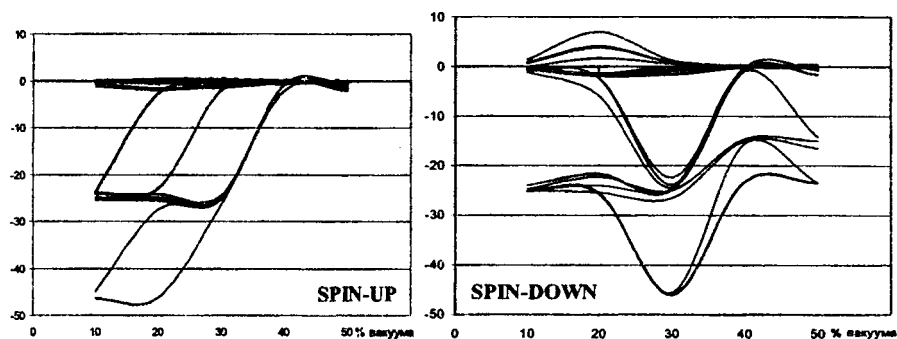


Рис. 4. Зонная структура оксида самария при разном количестве разорванных связей в поверхностном слое

В процессе анализа обратной решетки выполнен расчет зонной структуры оксида самария при разном количестве разорванных связей в поверхностном слое (рис. 4). Сопоставление зонной структуры с разной направленностью спина показывает, что оксид самария проявляет биметаллические свойства. Для электронов со спинами вверх наблюдается уменьшение запрещенной зоны вплоть до нуля, что характеризует поверхность оксида самария для электронов данного типа как металлическую. В то время как для электронов со спинами вниз, ширина запрещенной зоны изменяется незначительно и граница раздела диэлектрик-вакуум имеет область насыщения (для электронов) и область обеднения (для дырок).

Р. С. Авторы выражают искреннюю благодарность профессору БГУИР, доктору физ.-мат. наук Нелаеву В. В. за предоставленную возможность проведения исследований с использованием программы VASP/VAMP, постоянное внимание к выполняемой работе и помощь в интерпретации полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Наносенсоры на основе сверхтонких пленок редкоземельных соединений // Нанотехника. — 2009. — № 1. — С. 45–48.
2. Гулай В. А. Электрофизические свойства туннельных сенсорных МДМ-наноструктур на основе оксидов РЗЭ // Электроника-инфо — 2007. — № 9. — С. 52–56.
3. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Туннельные МДМ-наносенсоры: стратегии и технологии моделирования // Нано- и

микросистемная техника. — 2007. — № 9. — С. 46–52. 4. Koleshko V. M., Gulay A. V., Gulay V. A. Simulation of tunneling sensor MIM-nanostructures // Proceedings of SPIE. — 2009. — V. 7377. — № 7377-39.

УДК 631.5/9:004

Колешко В. М., Гулай А. В., Польшкова Е. В., Гулай В. А.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Эффективная реализация технологий точного земледелия возможна на основе получения и использования достоверной информации о плодородии почвы в каждой точке обрабатываемого сельскохозяйственного поля. Одно из основных направлений точного земледелия включает построение электронных почвенных карт и связанных с ними электронных карт планируемого урожая. Анализ электронных карт позволяет специалистам сельского хозяйства выбирать оптимальные параметры отдельных технологических процессов, а также определять всю стратегию аграрного производства. Другим направлением применения интеллектуальных сенсорных систем точного земледелия является создание автоматизированных технологических комплексов для выполнения адаптивных процессов аграрного производства. Цель применения таких комплексов состоит в контроле неравномерности качества почвы по всей площади обрабатываемого поля и учете результатов мониторинга при дифференцированном внесении питательных веществ в каждой точке поля.

Варианты конструктивного исполнения интеллектуальных сенсорных систем для точного земледелия.

Эффективным инструментом исследования свойств почвы является контроль ее цветовых характеристик, которые наиболее полно определяются спектрами отражения. С учетом этого разработан цветоцветовой метод контроля почвы в режиме реального времени по ее спектральной отражательной способности. Сущность разработанного метода заключается в формировании информационного образа в виде сочетания оптических параметров почвы и определении на его основе характеристик качества, в частности, концентрации в почве органических веществ. Измерение параметров почвы в видимом диапазоне спектра производится с помощью набора светодиодов и фотоприемника, а также устройства обработки информации (рис. 1, а). Сигнал с выхода фотоприемника обрабатывается микропроцессорным устройством, формирующим сенсорный информационный образ почвы.

Разработанная мобильная сенсорная система для контроля почвы имеет следующие основные параметры. Объем измеряемого информационного образа почвы – 8 параметров (фиолетовый свет – 400 нм; синий – 470 нм; зеленый – 520 нм; желтый – 590 нм; оранжевый – 610 нм; красный – 630 нм; инфракрасное излучение; белый свет). Длительность формирования информационного образа почвы составляет 115 мс (8 информационных импульсов по 10 мс с временными промежутками между импульсами по 5 мс). Периодичность формирования информационных образов почвы равна 1 с, что при минимальной скорости транспортирования 2 км/час позволяет получить пространственное разрешение порядка 0,5 м.

Количество спектральных точек контроля n связано с масштабом неоднородности q отражательной способности почвы по оптическому диапазону следующим соотношением:

$$n \geq c \Delta \lambda / q, \quad (1)$$

где $c > 1$ – постоянная; $\Delta \lambda$ – ширина оптического диапазона. Учитывая, что величина q трудно поддается анализу и определению, разработана модификация сенсорной системы, в которой точки контроля не соотносятся с определенным цветом, а равномерно размещены вдоль

спектрального диапазона. Для такого варианта сенсорной системы использованы светодиоды с длиной волны излучения 405; 460; 505; 530; 570; 620; 660 нм.

Конструктивно интеллектуальная сенсорная система выполнена в виде унифицированного модуля (А), который встраивается в заглубляемый в почву механизм сельскохозяйственной машины. С целью совмещения процедуры мониторинга почвы с проведением технологической операции сенсорный модуль используется в составе сельскохозяйственного агрегата (Б). Сенсорный контроль осуществляется также с помощью разработанной автономной мобильной системы в виде прицепного устройства (В) к мини-трактору. Кроме того, модификацией конструкции интеллектуальной сенсорной системы является малогабаритное устройство (Г) для небольших фермерских хозяйств. Интеллектуальная система оснащается аппаратурой спутниковой навигации, что позволяет определять географические координаты точек контроля почвы и использовать результаты мониторинга для создания высокоточных электронных почвенных карт.

Распознавание информационных образов в технологии интеллектуального сенсорного контроля почвы.

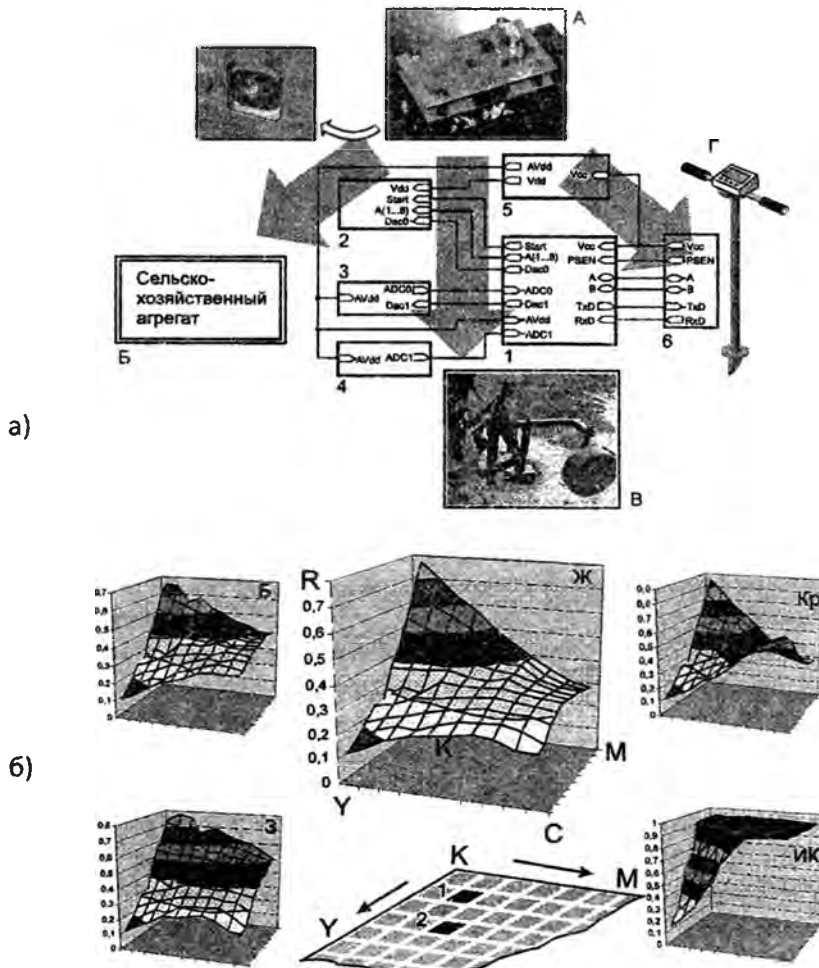


Рис. 1. а - Конструктивные варианты интеллектуальной сенсорной системы для точного земледелия (А-Г) и ее функциональная схема: 1 — микроконтроллер управления и обработки информации; 2 — схема управления светодиодами; 3 — схема подключения фотоприемника; 4 — схема контроля температуры; 5 — источник вторичных напряжений; 6 — разъем СОМ-порта;

б - Зависимости коэффициентов отражения оптического излучения с разной длиной волны от цвета эталонной поверхности: Ж — желтый свет; Кр — красный; З — зеленый; ИК — инфракрасное излучение; результаты идентификации почвенных образцов: 1, 2 — соответственно темно-серая и светло-серая почвы.

Одной из наиболее сложных операций в интеллектуальной технологии мониторинга почвы является распознавание формируемых информационных образов. В данном случае под распознаванием светового сенсорного образа почвы понимается сопоставление по определенному правилу цвета почвенного образца, представленного полученным набором коэффициен-

тов яркости для разных длин волн оптического излучения, с одним из эталонных образов из их фиксированного перечня. В качестве решающего правила используется способ выбора наиболее близкого эталонного образа по наименьшей величине евклидова расстояния:

$$D(X_i, X_j) = \{\sum A_j(x_{ik} - x_{jk})^2\}^{1/2}, \quad (2)$$

где D – евклидово расстояние; A_j – весовые коэффициенты; x_i, x_j – соответственно значения коэффициентов яркости для эталона и исследуемого почвенного образца. Весовые коэффициенты выбираются пропорциональными значениям коэффициента яркости контролируемых почвенных образцов.

Для получения эталонных цветовых образов разработана палитра, состоящая из 10×10 цветовых ячеек, причем в угловых ячейках палитры представлены основные полиграфические цвета стандартной системы СМУК (С – cyan; М – magenta; Y – yellow; К – black). Остальные цвета ячеек палитры представляют собой смесь основных цветов системы СМУК – с убыванием одного цвета и возрастанием другого цвета на 10% при переходе от одной ячейки к другой. Кроме этого получены линейки (по 10 ячеек) цветовых оттенков, наиболее близких к основным оттенкам почвенных образцов. Насыщенность цвета в каждой линейке равномерно уменьшается с постепенным переходом к белому цвету (уменьшение насыщенности цвета в каждой последующей ячейке составляет 10%). Данная система эталонных цветовых образов выбрана в связи с тем, что при необходимости точной идентификации цвета палитры и, соответственно, цветового оттенка почвы, имеется возможность воспользоваться системами именованных цветов, например Pantone (R).

С использованием разработанной палитры получали поверхности значений коэффициентов отражения для каждого цвета оптического излучения (рисунок 1, б). Путем сравнения системы коэффициентов отражения почвенных образцов и эталонных поверхностей с помощью выражения (2) определяли величину евклидова расстояния. По минимуму данного расстояния выбирали цветовую ячейку палитры, соответствующую оттенку исследуемой почвы. Например, цвету темно-серой почвы соответствует ячейка 1, расположенная во втором ряду от линии «КМ» и линии «KY», а цвету светло-серой почвы – ячейка 2, которая находится в четвертом ряду от линии «КМ» и в третьем ряду от линии «KY». Таким образом, по значениям коэффициентов отражения, получаемым с использованием разработанной сенсорной системы, определяется цвет исследуемой почвы. Это дает возможность идентификации почвы по набору эталонных почвенных образцов, сведения о качестве которых содержатся в базе данных интеллектуальной системы.

УДК 656

Колешко В.М., Рыженков О.Е.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время очень остро стоит проблема смертности на дороге. К сожалению, дорога не прощает ошибок, а человек склонен их совершать. К тому же с каждым днем растет интенсивность дорожного движения и человек все хуже и хуже справляется с первой обязанностью водителя – обеспечением безопасности движения. Сегодня для повышения безопасности используются карательные меры по отношению к нарушителям, но такой подход изначально предусматривает, что правонарушение будет совершено, а уже потом водитель понесет наказание. Конечно, предполагается, что из страха перед наказанием человек не будет нарушать правила дорожного движения, однако как показывает практика, страх перед наказанием в будущем гораздо слабее, чем потребность самоутверждения или просто невежество в настоящем. Пока

что человеку-водителю нет альтернативы, но положение можно исправить – управление автомобилем можно передать интеллектуальной системе, которая будет обладать навыками водителя. Такие системы можно заставить строго следовать правилам, и если не удастся совсем избежать гибели людей, то, по крайней мере, можно значительно снизить смертность на дорогах.

Одним из этапов отстранения человека от регулирования дорожного движения является создание интеллектуальной системы распознавания дорожных знаков. Данная система может устанавливаться на автомобиле, чтобы помогать водителю сориентироваться в незнакомой дорожной обстановке. Такая система является первым шагом к созданию автономного транспортного средства, управляемого без помощи водителя.

В функционировании системы распознавания дорожных знаков можно выделить два основных этапа: идентификация дорожных знаков и классификация. На этапе идентификации изображение разбивается на области, в которых по косвенным признакам наиболее вероятно нахождение дорожных знаков. Для определения областей-кандидатов, в которых может находиться дорожный знак, можно использовать цветовые и/или геометрические свойства дорожных знаков. Системы, основывающиеся на анализе формы, работают медленнее, чем системы с идентификацией на основе цвета. Это происходит потому, что для анализа формы объекта требуется рассчитывать взаимное распределение яркостей пикселей изображения, а для идентификации цветов требуется простейшая процедура пороговой фильтрации, выполняемая за время, пропорциональное размеру изображения. [1]

Разработанная интеллектуальная система основана на идентификации характерных цветов дорожных знаков. Работу системы можно разбить на несколько этапов. Для наглядности приведем схему системы на рисунке 1.

В работе системы можно выделить пять этапов распознавания. Первый этап, ему соответствует пиктограмма фотоаппарата на рисунке, подразумевает под собой захват изображения. Это может быть как статическое, так и видео изображение, в зависимости от конкретной поставленной задачи. Так как видеоизображение можно рассматривать как набор последовательных во времени статических картинок, то целесообразно рассмотреть проблему в применении к статическому изображению.

Второй этап распознавания, это выделение цветов на изображении, из которых состоят дорожные знаки[2,3]. Таких цветов пять: красный, синий, желтый, белый, зеленый.

Критерием того что пиксель окрашен в определенный цвет служат следующие уравнения:

–красный:

$$\begin{cases} K_{bgm}B + K_{bga}R > G \\ K_{gbm}G + K_{gba}R > B \end{cases} ; \quad (1)$$

–синий:

$$\begin{cases} K_{rgm}R + K_{rga}B > G \\ K_{grm}G + K_{gra}B > R \end{cases} ; \quad (2)$$

–желтый:

$$\begin{cases} R \geq G \\ K_{yg}G > R + K_{yb}B \end{cases} ; \quad (3)$$

–белый:

$$\begin{cases} |R - G| + |B - G| + |B - R| < K_{wd}(R + G + B) \\ (R + G + B) > K_{wh} \end{cases} \quad (4)$$

где R, G, B – это соответствующие каналы в цветовом пространстве RGB, K с различными индексами – являются эмпирически найденными константами.

Маска представляет собой матрицу размером соответствующую размеру исходного изображения, с логическим типом элементов. Если пиксель отвечает условию какого-либо неравенства, то в соответствующей маске элемент с таким же адресом, как у этого пикселя устанавливается в «1», иначе в «0».

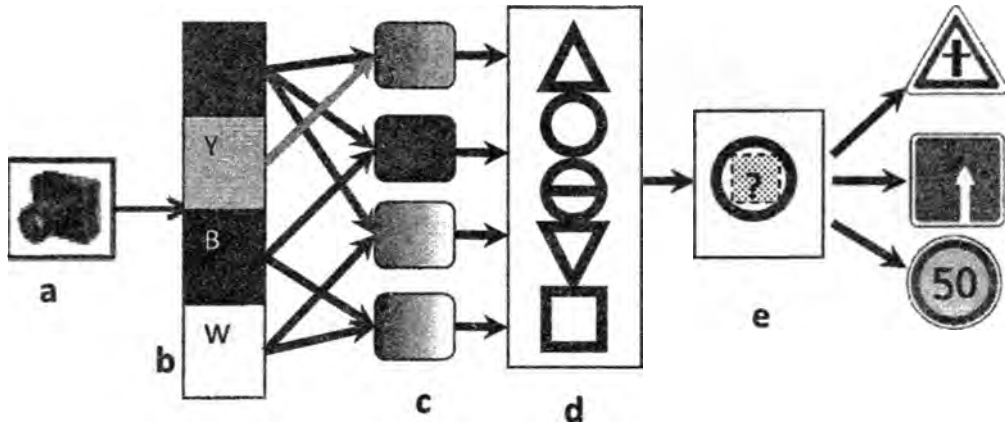


Рис. 1. Схема системы распознавания дорожных знаков с идентификацией на основании цветовых характеристик. а) - захват изображения; б) - выделение цветов на изображении, из которых состоят дорожные знаки; с) - поиск пересечений цветов; д) - приведение к одному размеру и распознавание формы; е) - распознавание пиктограмм.

Для того чтобы отфильтровать существенную долю помех используется фильтр площади области. Алгоритм его работы таков: области, площадь которых меньше определенного значения, и области, площадь которых больше другого значения, убираются. Таким образом, на изображении остаются только объекты с угловыми размерами соответствующими дорожным знакам.

Если на изображении присутствует дорожный знак то можно с большой долей вероятности сказать, что он состоит из комбинации каких-либо цветов из этого списка. Поэтому все области, лежащие за пределом объединения масок этих цветов, можно исключить из поиска дорожных знаков. Исключить из рассмотрения можно также области принадлежащие данным цветам, но имеющие слишком большие или, наоборот, слишком маленькие размеры. На этом же этапе происходит еще один тип фильтрации. Он основан на том, что цвета на дорожных знаках могут встречаться только в определенных комбинациях, таких как: красный + синий; красный + белый; красный + желтый; синий + белый.



Рис. 2. Эталонные изображения форм дорожных знаков.

На третьем этапе знаки должны быть приведены к одному размеру. Этот этап нужен потому, что размеры знаков, которые необходимо распознавать, в зависимости от дальности, могут отличаться вплоть до десяти раз. Кроме того, из-за искажений перспективы области-кандидаты зачастую нуждаются в корректировке пропорций по ширине и высоте. Данная операция реализована при помощи билинейной фильтрации ввиду оптимального соотношения искажений со временем, затрачиваемым на обработку.

Четвертый этап представляет собой распознавание формы знака[4]. Так как формы знаков строго стандартизированы, то это позволяет дополнительно избавиться от лишней информации и в то же время отсортировать знаки по форме, а значит подготовить те пиктограммы из эталонной базы к сравнению, которые возможны только для данной конкретной формы знака. Такая сортировка позволяет уменьшить время на трудоемкую процедуру распознавания пикто-

грамм знаков[5]. Для реализации этого этапа выбрана процедура корреляции с эталонными изображениями форм дорожных знаков, которые представлены на рисунке 2.

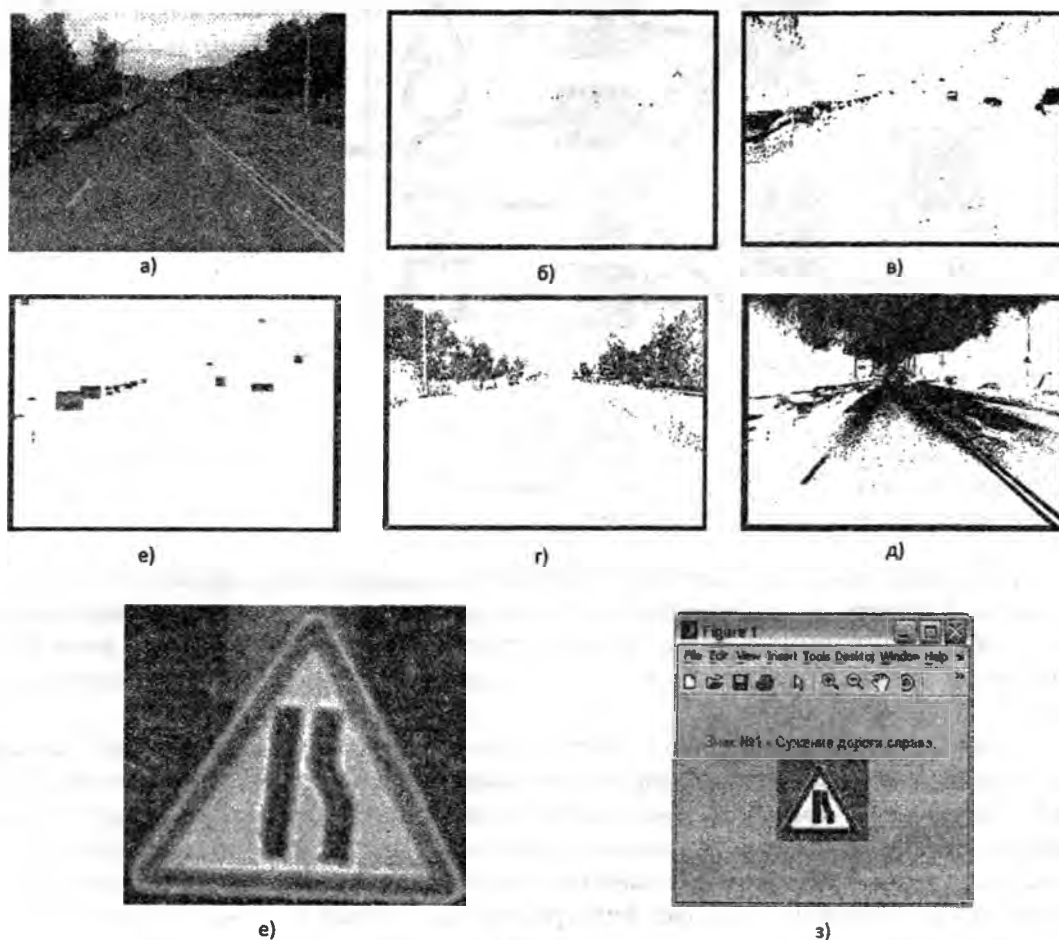


Рис. 3. Пример выполнения программы: а) исходное изображение для тестового моделирования; б)–д) – маски различных цветов (б) – маска красного цвета; в) – маска синего цвета; г) – маска желтого цвета; д) – маска белого цвета) е) –области-кандидаты на обнаружение дорожных знаков; ж) – регион, найденный на изображении; з) – результат выполнения программы.

После того как знаки отсортированы по форме можно приступить непосредственно к этапу распознавания конкретных видов знаков. Для этой цели было решено выбрать функцию корреляции изображения дорожного знака с эталонными пиктограммами.

Следует отметить, что нами временно была опущена одна процедура, которая также часто встречается при распознавании дорожных знаков – это процедура изменения угла наклона изображения дорожного знака. Данный этап был опущен, потому что в реальных условиях наклоны дорожных знаков лежат в пределах 5° - 10° , а при таких углах система дает удовлетворительные показатели распознавания и без исправления наклона знака. Несмотря на то, что данное решение ухудшает работу системы, однако это позволяет существенно сократить время на обработку дорожной ситуации, что довольно критично при применении данной системы в условиях реального времени[6].

За автомобилями с интеллектуальной системой управления движением без помощи водителя, составной частью которой является интеллектуальная система распознавания дорожных знаков – будущее на наших дорогах. Именно такие системы могут сделать дороги по настоящему безопасными.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Loy, N. Barnes "Fast Shape-based Road Signs Detection for a Driver Assistance System," in Procs. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, Sept. 2004. pp. 70–75.
2. A. de la Escalera, J. M. Armignol, M. Mata, "Traffic sign recognition and analysis for intelligent vehicles," *Image and Vision Computing*, vol. 21, no. 3, Mar. 2003. pp. 247–258.
3. X. Gao, N. Shevtsova, K. Hong, S. Batty, L. Podladchikova, A. Golovan, D. Shaposhnikov, and V. Gusakova, "Vision Models Based Identification of Traffic Signs," in Procs. of Europ. Conf. on Color in Graphics Image and Vision, Poitiers, France, Apr. 2002. pp. 47–51.
4. H. Hoessler, C. Wöhler, F. Lindner, and U. Kreßel, "Classifier training based on synthetically generated samples," in Procs. 5th Intl. Conf. on Computer Vision Systems, Bielefeld, Germany, Mar. 2007. pp. 47–51.
5. S. Lafuente-Arroyo, P. Gil-Jiménez, R. Maldonado-Bascón, F. López-Ferreras, S. Maldonado-Bascón Dpto. "Traffic sign shape classification evaluation I: SVM using Distance to Borders", de Teoría de la Señal y Comunicaciones Universidad de Alcalá de Henares. Madrid 2002.
6. A. Broggi, P. Cerri, P. Medici, P. Paolo, "Real Time Road Signs Recognition" *Porta VisLab – Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione Università degli Studi di Parma, ITALY Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Istanbul, Turkey, June 13-15, 2007.* pp. 968–971.

УДК 681.586

Колешко Л.А., Сунка В.Я.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ МИКРО-НАНОАКТЮАТОРЫ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Актюатор – это устройство, которое преобразовывает энергию в управляющее движение и является составной частью микроэлектромеханических систем (МЭМС). Применение актюаторов весьма широко – от микро – наносенсорики, робототехники, биомедицины, измерительно-управляющих устройств, автомобилестроения, космической и военной техники до различных дозирующих устройствах домашнего хозяйства и технологии развлечения. В настоящее время, заметно отставание в создании высокоточных и миниатюрных актюаторов линейного и ограниченного углового перемещения. В наибольшей мере указанным требованиям могут удовлетворять (ПА) и пьезомоторы (ПМ). Они имеют уникальную совокупность положительных свойств: высокая разрешающая способность, малые размеры, широкий диапазон рабочих частот, значительные выходные усилия, отсутствие внешнего электромагнитного поля, широкий температурный диапазон, достаточная надежность. Необходимое перемещение достигается за счет обратного пьезоэффекта при деформации пьезоэлемента при подаче на него электрического напряжения. Конструктивно пьезоактюатор выполняются в виде отдельных пьезопластин или составного блока: секционного монолитного, склеенного составного и составного упруго поджатого пьезопреобразователя. ПА обеспечивает перемещения до десятков и сотен микрометров с нанометрической точностью.

Недостаток используемых пьезоэлектрических актюаторов – существенное изменение выходных параметров (усилия, амплитуды или скорости механического перемещения) вследствие изменения резонансной частоты узкополосной механической ультразвуковой колебательной системы (УЗКС), основной конструктивной части актюатора, при воздействии дестабилизирующих факторов (температуры, усилия прижима, шероховатости контактирующих материалов, старения и т.д.). Повысить стабильность выходных параметров таких актюаторов возможно расширением полосы пропускания их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) [1,2] выходных механических параметров. Такие широкополосные микро – наноактюаторы – это новый класс МЭМС, которые имеют существенные преимущества по сравнению с узкополосными (резонансными) по стабильности микро- наномеханических параметров при изменении режимов эксплуатации МЭМС.

Для моделирования актюаторов и проведения расчетов электромеханических параметров широкополосных на системе связанных электрических и механических резонансных контуров (ЭМСК) и сравнения результатов расчета с экспериментом составим полную эквивалентную шестиполусную электрическую схему замещения актюатора, представленную на рис.1, где R_s – внутреннее сопротивление источника питания. Для выполнения расчетов с помощью матричного исчисления разделим эквивалентную схему замещения (рис. 1) на пять элементарных звеньев. Для каждого звена запишем обобщенные матричные выражения.

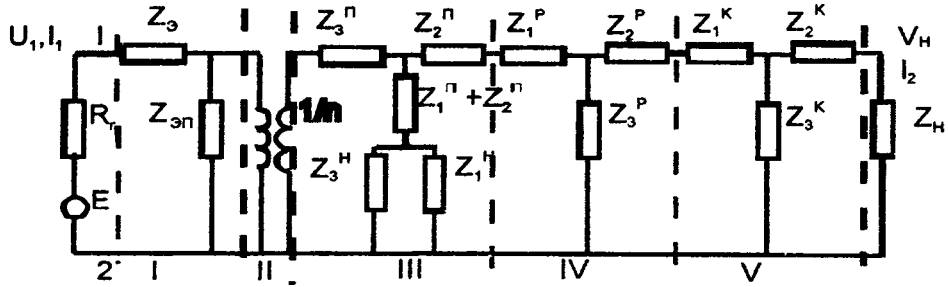


Рис. 1

1. Звено электрических сосредоточенных параметров

$$A_I = \begin{bmatrix} 1 + Z_3 / Z_{ЭП} & Z_3 \\ 1 / Z_{ЭП} & 1 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

где Z_3 - импеданс последовательно соединяемого с УЗКС реактивного элемента, знак реактивности которого противоположен знаку статической реактивности “заторможенного” преобразователя УЗКС. Для УЗКС с пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) $Z_3 = j\omega L_k + R$, а для УЗКС с магнитострикционным преобразователем (МСП) $Z_3 = (1/j\omega C_k) + R$; $Z_{ЭП}$ – импеданс статической реактивности “заторможенного” преобразователя, при этом для УЗКС с ПЭП $Z_{ЭП} = (1/j\omega C_3) + R$, а для УЗКС МСП $Z_{ЭП} = j\omega L_3 + R$. Здесь величина R - активные потери в реактивных электрических элементах первого звена.

2. Коэффициент электромеханической связи второго звена записывается матрицей

$$A_{II} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ n & n \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где n – коэффициент электромеханической трансформации. Например, для УЗКС с ПЭП величина $n = d_{33} E_{ю} \cdot S \cdot d$, где d_{33} – пьезомодуль, $E_{ю}$ – модуль Юнга, S – площадь и d – толщина пьезоэлемента.

3. Пьезоэлектрический преобразователь с отражающей (демпфирующей) накладкой. На рис. 1 приняты обозначения: Z_i^N и Z_i^H – импедансы, соответственно пьезоэлектрического преобразователя и отражающей накладки $i = 1, 2$ и 3. Матрица звена равна

$$A_{III} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_3^N}{Z_o} & Z_3^N + Z_2^N + \frac{Z_3^N \cdot Z_2^N}{Z_o} \\ \frac{1}{Z_o} & 1 + \frac{Z_2^N}{Z_o} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где $Z_o = Z_1^N + Z_2^H + (Z_3^H \cdot Z_1^H) / (Z_3^H + Z_1^H)$.

4. Матрица излучающей (рабочей) накладки запишется выражением

$$A_{IV} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_1^P}{Z_3^P} & Z_1^P + Z_2^P + \frac{Z_1^P \cdot Z_2^P}{Z_1^P + Z_2^P} \\ 1 + Z_3^P & 1 + \frac{Z_2^P}{Z_{3P}^P} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где Z_i^P – импеданс рабочего инструмента. Если пьезоэлементы, отражающая и рабочая накладки выполнены цилиндрическими, то без учета потерь их импедансы записываются выражениями [7-9]

$$Z_1^Q = Z_2^Q = j p_o \cdot c_o \cdot S_o \cdot \operatorname{tg}(k_o \cdot d_o / 2), \quad Z_3^Q = -j (p_o \cdot c_o \cdot S_o / (\sin k_o \cdot d_o)), \quad (5), (6)$$

где p_o, c_o, S_o, d_o – плотность, скорость звука, площадь поперечного сечения и толщина d (длина) соответствующего элемента, k_o – волновое число, $Q = \Pi, H, P$.

5. Для концентратора – рабочего инструмента, служащего для увеличения амплитуды механических колебаний, матрица записывается выражением

$$A_V = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_1^K}{Z_3^K} & Z_1^K + Z_2^K + \frac{Z_1^K \cdot Z_2^K}{Z_3^K} \\ \frac{1}{Z_3^K} & 1 + \frac{Z_2^K}{Z_3^K} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где Z_i^K – составляющие (импедансы) Γ – образной электрической схемы замещения концентратора. Конкретные выражения для Z_1^K, Z_2^K и Z_3^K концентраторов конического, экспоненциального и катеноидального и др. можно найти в [9].

Суммарная обобщенная матрица всей эквивалентной электрической схемы замещения УЗКС с системой ЭМСК равна произведению матриц отдельных звеньев

$$A_{\Sigma} = [A_I] \cdot [A_{II}] \cdot [A_{III}] \cdot [A_{IV}] \cdot [A_V] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Запишем выражения для расчета параметров широкополосных УЗКС на системе ЭМСК: – входной электрический импеданс Z_{oo} между входными точками 1-2 УЗКС (рис. 1)

$$Z_{oo} = (A_{11} Z_H + A_{12}) / (A_{21} Z_H + A_{22}), \quad (9)$$

где Z_H – сопротивление нагрузки на торец концентратора УЗКС; – коэффициент электромеханической трансформации

$$K_{ЭТ} = (V_H / I_1) \sim (I_2 / I_1) = A_{21} \cdot Z_H + A_{22}, \quad (10)$$

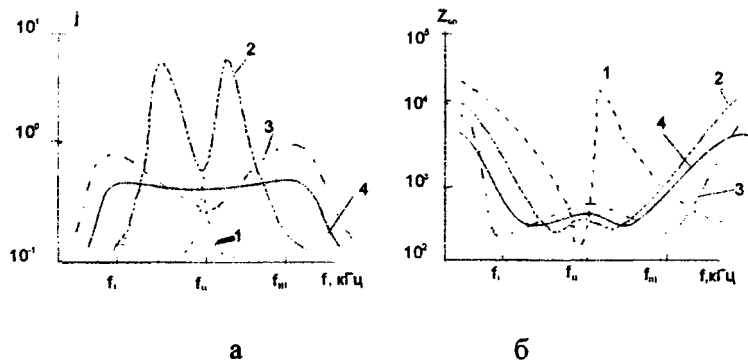
где V_H – скорость механических колебаний в нагрузке, I_1, I_2 , – входной и выходной ток УЗКС системы;

– коэффициент электромеханического преобразования

$$K_{ЭП} = (V_H / U_1) \sim (I_2 / U_1) = A_{11} \cdot Z_H + A_{12}, \quad (11)$$

где U_1 – электрическое напряжение на входе УЗКС (рис. 1).

В выражениях (10) и (11) в соответствии с первой системой электромеханических аналогий выходной ток I_2 пропорционален скорости механических колебаний торца рабочего инструмента.



1,2,3,4 – $L_k = 0, 10^{-4}, 4 \cdot 10^{-3}, 0,5 \cdot 10^{-3}$ Гн; 1- узкополосный и 2 – 4 – широкополосный актюатор

Рис.2. Частотные зависимости относительного коэффициента преобразования $j(a)$ и входного импеданса Z_{oo} (б)

На рис. 2 приведены типичные АЧХ, рассчитанного по выражениям (10) и (11) нормированного значения коэффициента $j = K_{ЭП} / K_{ОО}$ электромеханического преобразователя (а) относительно ненагруженного пьезоэлемента, при этом $K_{ОО} = 2e / l_o$, и входного электрического импеданса (б). Здесь e – пьезоэлектрическая константа, и l_o – толщина пьезоэлектрической пластины. Расчеты выполнены для широкополосной УЗКС с статической емкостью $C_s = 6500$ пФ, величиной последовательно включенной индуктивности L_k при ее добротности $Q_l = 50$. Значение индуктивности изменялось от $L_k = 10^{-6}$ Гн до $L_{ко} = 1/[4\pi^2 f_p^2 C_s] \sim 10^{-3}$ Гн, где $f_p \sim f_{II}$ – частота резонанса максимума механических колебаний узкополосной УЗКС. Для выравнивания АЧХ относительного коэффициента передачи j с целью получения симметричной АЧХ при каждом значении компенсирующей индуктивности L_k параллельно емкости C_s включалась корректирующая емкость $C_{кор}$ величиной,

$$C_{кор} = [1/(4\pi^2 f_p^2 L_k)] - C_s. \quad (12)$$

Из приведенных графиков (рис. 2) очевидно, что на АЧХ параметров имеются три экстремума на частотах связи f_I , $f_{II} = f_m$ и f_{III} , при этом частотный диапазон $\Delta f = f_{III} - f_I$, всегда шире, чем динамический частотный диапазон исходной УЗКС $\Delta f_d = f_n - f_m$, ненагруженной входными реактивными элементами. Здесь и f_n и f_m – частота резонанса минимума и максимума входного импеданса УЗКС.

Физическая сущность увеличения полосы пропускания системы УЗКС такая же, как и системы электрически связанных контуров (ЭСК) [5]. Она обусловлена компенсацией собственного реактивного сопротивления электрического (первичного) контура $L_k \cdot C_s$, внесенным реактивным сопротивлением вторичного механического контура $L_m \cdot C_m$. Поэтому на частотах связи f_I и f_{III} входной импеданс имеет одинаковое и меньшее значение, чем на частоте связи f_{II} . Электрическая мощность потребления широкополосной УЗКС на частотах связи f_I и f_{III} , одинаковая и существенно больше, чем на частоте связи f_{II} .

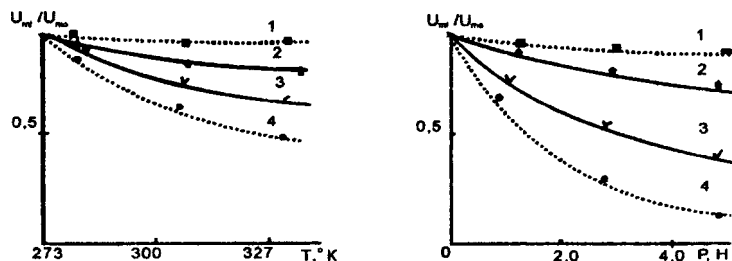
Если проводить аналогию между характеристиками рассматриваемой широкополосной УЗКС и характеристиками системы электрически связанных контуров (ЭСК), то можно отметить следующее. Частотные зависимости входного импеданса широкополосной УЗКС и первичного контура системы ЭСК подобны, в то же время частотные зависимости механических выходных параметров широкополосных УЗКС (скорости, амплитуды механических колебаний) и тока во вторичном контуре системы ЭСК подобны, но не идентичны. В системе ЭСК ток в первичном электрическом контуре на частотах связи f_I и f_{III} уменьшается с ростом коэффициента связи $K_{эс}$, пропорционального корню квадратному из отношения емкостей первичного и вторичного контуров, до определенной критической величины $K_{эс\text{ кр}}$. При дальнейшем увеличении значения $K_{эс} \geq K_{эс\text{ кр}}$ величина тока в первичном контуре на частотах f_I и f_{III} остается неизменной, т. к. величина вносимого активного сопротивления из вторичного контура остается постоянной. Во вторичном электрическом контуре системы ЭСК ток также увеличивается с

ростом величины $K_{эс}$ от нулевого значения до определенного значения, соответствующего критическому значению коэффициента $K_{эс} = K_{эс\text{кр}}$. При условии, что $K_{эс} \geq K_{эс\text{кр}}$ ток во вторичном контуре не увеличивается и его значение определяется активным сопротивлением вторичного электрического контура [8].

В системе ЭМСК электрический ток в первичном электрическом контуре и скорость механических колебаний во вторичном контуре на частотах связи f_I и f_{III} монотонно уменьшается при увеличении коэффициента $K_{эс}$, равного корню квадратному из отношения емкостей механического и электрического контуров. Это происходит потому, что вносимое в первичный контур сопротивление механических потерь увеличивается с ростом ширины полосы пропускания $\Delta f = f_{III} - f_I$. При компенсации в первичном контуре реактивного сопротивления емкости C_3 в нем остается только активное сопротивление индуктивности и активное внутреннее сопротивление источника питания $R_э$, а также вносимого из вторичного механического контура сопротивления нагрузки

$$R_B = 1/R_M [2\pi f_i(C_3 + C_{кор})]^2, \quad (13)$$

где R_M – сопротивление механических потерь на частоте связи f_{II} . Хорошо известно, что АЧХ сопротивления потерь R_M имеет закон изменения, близкий к нормальному закону распределения Гаусса с максимумом значения на частоте резонанса f_{II} . На частотах связи f_I и f_{III} величина сопротивления R_B меньше, чем на частоте f_{II} . Это различие тем больше, чем шире полоса частот $\Delta f = f_{II} - f_I$ или $\Delta f = f_{III} - f_{II}$. При полосе пропускания $\Delta f = f_{III} - f_I$, в 15-20 раз превышающей ширину полосы пропускания исходной узкополосной УЗКС, полное сопротивление в первичном контуре определяется, в основном, только величиной активного сопротивления индуктивности L_k (зависимости 1- 4 рис.2,б). Это сопротивление возрастает при неизменной величине добротности при увеличении индуктивности L_k . Поэтому полный ток в первичном контуре системы ЭМСК уменьшается, а значит, например, скорость механических колебаний также уменьшается. Одновременно уменьшение скорости механических колебаний на частотах связи f_I и f_{III} происходит и от того, что для возбуждения механической системы необходима тем большая электрическая мощность, чем больше отличается частота связи f_I и f_{III} от резонансной частоты связи f_{II} .



а б
1; 2; 3; 4 - $\Delta f = 150; 380; 2000$ и 9200 Гц; 1- исходный узкополосный и 2-4 – широкополосный актюатор.
Рис.3. Зависимости относительной величины амплитуды механических колебаний от изменения температуры (а) и статического давления (б).

Сравнение расчетов резонансных частот связи по АЧХ входного импеданса системы ЭМСК по упрощенной (двухполюсной) и полной (шестиполюсной) эквивалентной электрическим схемам замещения с полученными экспериментальными результатами показывает, что расчеты по полной эквивалентной схеме более точны и отличаются от эксперимента не более чем на $2 \pm 3\%$. В то же время расчеты по упрощенной электрической схеме имеют погрешность определения резонансных частот $6 \pm 15\%$.

Проведены сравнительные испытания широкополосных микро пьезоактюаторов на системе ЭМСК с коническим концентратором, имеющим коэффициент усиления амплитуды механических колебаний $N = 5$, и узкополосной УЗКС при изменении режимов эксплуатации: подводимой электрической мощности; температуры от 273°K до 340°K и статического давления до 5 Н на торец рабочего

инструмента цилиндрической формы диаметром 2 мм, закрепленного на узкой части концентратора, перпендикулярно продольной оси концентратора. На рис. 3 представлены некоторые полученные экспериментальные зависимости относительной величины амплитуды механических колебаний U_{mi} / U_{mo} на торце концентратора при изменении температуры прогрева (рис. 3,а) и статического давления (рис. 3,б). Здесь U_{mo} и U_{mi} – амплитуда механических колебаний без влияния дестабилизирующих факторов и при их наличии.

Полоса пропускания исходной УЗКС с коническим концентратором [1] составляла величину $\Delta f_o = 140$ Гц. При подключении последовательной индуктивности $L_k = L_{ko}$ и образовании системы ЭМСК полоса увеличилась до $\Delta f = 9200$ Гц, т. е. в ~ 65 раз. Выравнивание амплитуды механических колебаний в полосе пропускания проводилось изменением активной составляющей первичного электрического контура (регулирование электрической добротности), а также и изменением, при необходимости, волнового сопротивления отражающей накладкой (демпфера) отражающей стороне пьезоэлектрической пластины. Изменение ширины полосы от $\Delta f = 9200$ Гц до $\Delta f_o = 140$ Гц проводилось уменьшением величины индуктивности L_k при одновременном увеличении корректирующей емкости $C_{кор}$.

Из приведенных графиков очевидно существенное повышение стабильности механических колебаний широкополосных пьезоэлектрических актюаторов. Например, при увеличении температуры нагрева актюатора до 340 °К при полосе $\Delta f = 380$ Гц (расширение полосы в ~ 3 раза) стабильность повышается в 1,4 раза (зависимости 1,3 рис. 3,а), а при увеличении полосы до $\Delta f = 9200$ Гц стабильность повышается в 9 раз по сравнению с исходным узкополосным актюатором (зависимости 1,4 рис. 3.а).

Еще большее повышение стабильности (устойчивости) амплитуды механических колебаний U_m в широкополосных актюаторах имеет место при воздействии статического или динамического давления до 5 Н на торец рабочего инструмента актюатора. Так, по сравнению с исходным узкополосным актюатором расширении полосы пропускания в 3 раза стабильность амплитуды U_{mi} / U_{mo} повышается в ~ 2 раза (зависимости 1,3 рис. 3,б). При максимально достижимой полосе пропускания $\Delta f = 9200$ Гц стабильность повышается - до ~ 30 раз (зависимости 1,4 рис. 3,б).

Приведенные исследования показывают перспективность проведения дальнейших исследований в области создания широкополосных пьезоэлектрических актюаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сунка В.Я., Колешко Л.А. Механические параметры широкополосных ультразвуковых микро- наноактюаторов. Теоретическая и прикладная механика, 2010, вып.25.с.121-126.
2. Колешко В.М., Сунка В.Я. Авт. свид. СССР №№ 694326, 721285, 725846, 733924, 763004, 793662.
3. Сунка В.Я., Колешко Л.А.. Исследование электронных схем расширения полосы частот ультразвуковых систем. Известия АН БССР, сер. ФМН-1980. №1. – С.89-95.
4. Домаркас В.И., Кажис, Р.-И.Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. - Вильнюс: Минтис, 1975. - 255с.
5. Харкевич А.А. Теория электроакустических преобразователей. - М.: Наука, 1973, т.1. – с.58-69.
6. Снытко А.Я. и др. Матрица параметров эквивалентных шестиполосников сложных пьезоактивных колебательных систем. Акустический журнал, 1976, т. XXII, в. 6. – с.922-930.
7. Лосев А.К. Теория и расчет электромеханических фильтров. – М.: Связь, 1965. – с.63-80.
8. Калашников А.М. и др. Колебательные системы. – М.: Военное издательство Мин. обороны, 1980. – с.80-113.
9. Гальперина А.Н. Расчет сложных ультразвуковых колебательных систем с помощью эквивалентных схем. – Акустический журнал, 1977, в. 5. с.710-715.

Кошешко В.М., Сунка В.Я., Воробей Е.А., Мардас Д.В.,
Сунка А.А., Романович Д.В., Храменков Е.В

МИКРОРЕЖИМНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время в информационно-измерительной технике интенсивно формируется новое направление интеллектуальных сенсорных систем (ИСС) измерения (по мировым стандартам IEEE 1451.1÷4) с передачей информации потребителю не только по традиционным интерфейсам, но и по беспроводным сетям передачи информации (БСПИ), выполненным по международным стандартам IEEE 802.05÷16 [1-2].

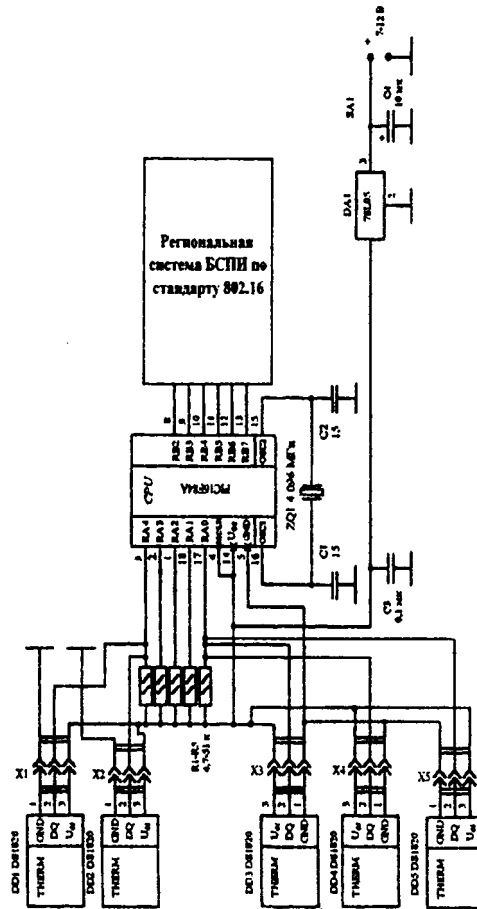


Рис. 1. ИСС измерения температуры частотным методом с передачей информации по БСПИ

В мире все более распространяется паутина ИСС для согласованного восприятия окружающего мира. На стадии разработки и начала эксплуатации находится все большее число ИСС с БСПИ широкого спектра назначения, в том числе для контроля технологических процессов различных отраслей промышленности, транспортных потоков, окружающей среды, погоды, землетрясений и так далее. Они же используются как в обычных технологических процессах, так и в системах промышленной безопасности, кризисного управления и в военной сфере. ИСС стали возможными ввиду ин-

тенсивного развития высококачественных микро- и наносенсоров, простых и недорогих микроконтроллеров и множества вариантов беспроводной связи.

Предлагается множество микро- наносенсоров для измерения различных величин по технологии микро- и нанозлектромеханических систем МЭМС/НЭМС стоимостью в несколько долларов. Ведущие компании микроконтроллерного профиля производят обширные семейства маломощных микроконтроллеров быстродействующих систем со встроенными и АЦП и ЦАП, а также с возможностью их программирования на языках низкого и высокого уровня.

Все большее распространение является интеграция связи БСПИ с Internet, что позволяет получить информацию от локальных сенсорных систем, в том числе и управление ими.

Разработанная система (рис. 1) предназначена для измерения температуры в пяти точках и передачи информации по БСПИ. В состав предложенной системы входят основные блоки: пять температурных сенсоров типа DS1820, микроконтроллер PIC16F84A, региональная система БСПИ по стандарту IEEE 802.16 и ряд вспомогательных узлов. Датчиком температуры в устройстве служит микросхема DS1820, которая измеряет температуру от -55 до +150 °С. В интервале температур от -10 до +85 °С изготовитель гарантирует погрешность измерения температуры $\pm 0,5$ °С. Во всем диапазоне измеряемых температур индикация выполняется с точностью 0,5 °С. Датчик температуры DD1 предназначен для измерения температуры в зоне 1, датчик температуры DD2, DD3, DD4, DD5 – в зоне 2, 3, 4, 5 соответственно (рис. 1). Датчики температуры подключаются к плате через разъемы X1, X2, X3, X4 и X5. Потребляемый системой ток при напряжении питания, равном 5 В, составляет 3 мА. Устройство работоспособно при снижении напряжения питания до 3 В [3].

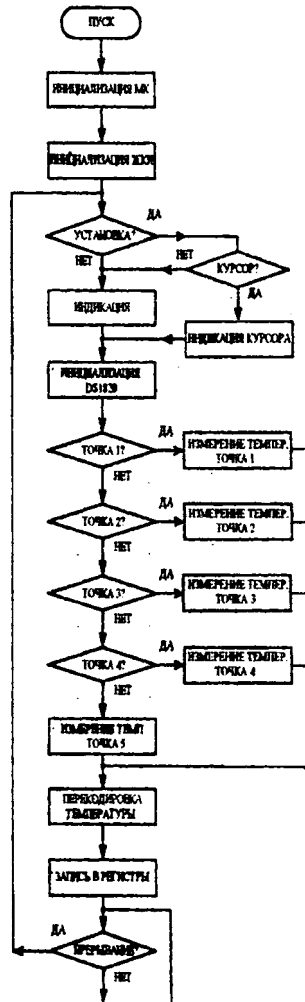


Рис. 2. Алгоритм работы программы микроконтроллера

Любая система должна соответствовать основным техническим и экономическим характеристикам, а именно: небольшая стоимость системы, низкое энергопотребление, простота реализации, взаимозаменяемость элементов системы и так далее. Поэтому было принято решение использовать в качестве микроконтроллера продукцию фирмы Microchip Technology, непосредственно микроконтроллер PIC16F84A. Основные характеристики данного микроконтроллера [5]:

- низкая стоимость: 2-4 доллара США;
- высокопроизводительный RISC-процессор;
- всего 35 команд для написания программы;
- скорость работы: тактовая частота до 20 МГц, минимальная длительность такта 200 нс;
- память программ (слов) 1024 байт FLASH;
- память данных ОЗУ 68 байт;
- память данных ЭСППЗУ 64 байт;
- 15 аппаратных регистров специального назначения;
- 8-уровневый аппаратный стек;
- 1000 циклов записи/стирания FLASH памяти программы;
- период хранения данных ЭСППЗУ более 40 лет;
- режим экономии энергии (SLEEP);
- экономичная, высокоскоростная технология КМОП ЭПЗУ/ЭСППЗУ;
- полностью статическая архитектура;
- широкий рабочий диапазон напряжений питания - от 2,0В до 5,5В;
- коммерческий, промышленный и расширенный температурный диапазоны;
- низкое потребление энергии: менее 2 мА при 5,0 В и менее 0,5 мкА в режиме STANDBY при 2 В.

Работу по принятию значений температур от датчиков, их обработку и выдачу в сеть БСПИ выполняет микроконтроллер PIC16F84A. Алгоритм работы программы микроконтроллера показан на рис. 2.

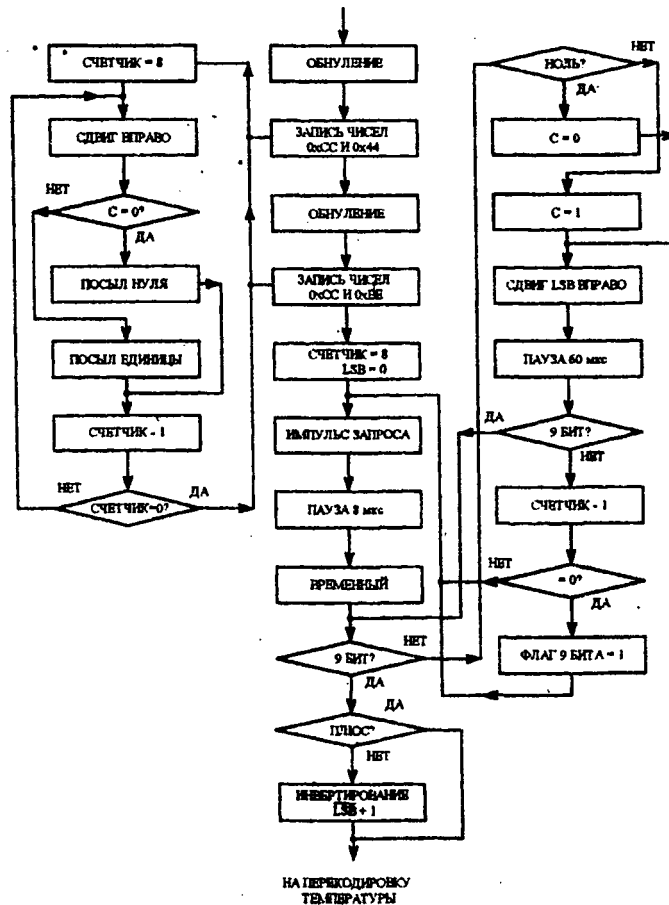


Рис. 3. Алгоритм работы программы

После подачи напряжения питания инициализируются регистры микроконтроллера. После индикации инициализируется датчик температуры. Сначала определяется необходимый датчик DD1, DD2, DD3, DD4 или DD5. Если в текущем режиме необходима температура от датчика DD1, то инициализируется и выполняются измерения датчиком температуры DD1, в противном случае измеряется температура в других четырех контролируемых зонах.

Принятый от датчиков DS1820 девятиразрядный двоичный код перекодируется в двоично-десятиричный код. Выделяется девятый разряд и определяется знак температуры. После завершения этих операций программа ожидает прерывание. Во время прерывания выполняется установка и перекодирование регистров. При частоте кварцевого резонатора, например $f_{\text{кв}} = 4,096$ МГц и величинах коэффициентов деления предделителя – 256 и делителя – 16, а также с учетом машинного цикла, равного четырем тактам, коэффициент деления регистра таймера должен быть равен 250. Перед выходом из прерывания выполняется предустановка таймера на число 6. Прерывания происходят через 1/16 с. После отработки прерывания цикл измерения температуры повторяется.

Для детального рассмотрения алгоритма работы программы по измерению температуры (рис. 2) рассмотрим принцип работы датчика температуры DS1820. Датчики температуры с однопроводным интерфейсом разработаны фирмой DALLAS SEMICONDUKTOR для использования совместно с микроконтроллерами. Каждый датчик температуры имеет 56-разрядный индивидуальный идентификационный код, поэтому по одному проводу может быть опрошено практически неограниченное число датчиков. Перед установкой таких датчиков в одну линию необходимо считать 64 разрядный код ROM (в него входит 56-битный номер датчика и 8 бит регистра контроля четности) для каждого датчика и учитывать его при программировании микроконтроллера [4].

Измерения температуры основано на сравнении частоты эталонного генератора и частоты второго генератора, в котором частота изменяется из-за изменения температуры контролируемой среды. Разность частот двух генераторов определяет значение температуры. Восьмиразрядный код температуры побитно, начиная с младшего бита, выводится в линию связи. Девятый бит определяет знак измеренной температуры. При единичном бите температура имеет знак минус, и наоборот. Передача каждого бита данных длится 60 мкс. Если длительность низкого уровня в линии от 1 до 15 мкс, то импульс идентифицируется как логическая 1. Логический 0 идентифицируется при длительности низкого уровня в линии от 15 до 60 мкс.

Все сеансы приема данных с датчика начинаются подачей в линию сигнала обнуления (RESET), установкой низкого уровня длительностью 480-960 мкс. В ответ датчик выдает в линию сигнал наличия (Presence) длительностью 60-240 мкс. Алгоритм работы программы измерения температуры в пяти зонах одинаков, поэтому можно рассмотреть его один раз (рис. 3). После обнуления линии передаются управляющие команды 0xCCh и 0x44h для начала измерения температуры.

Передача команды начинается с записи в счетчик числа принимаемых бит — 8. Сдвигом вправо выталкивается младший бит команды, который переписывается в бит С регистра STATUS. По значению бита С в линию посылается либо ноль, либо единица. Декрементируется счетчик, и его значение проверяется на ноль. Если счетчик пуст, то программа возвращается в точку посылки на ее выполнение. В противном случае в линию выдается значение следующего бита [4].

После передачи команд 0xCCh и 0x44h посылаются команды 0xCCh и 0xBEh на считывание температуры. Перед приемом числа обнуляется регистр приема LSB и устанавливается счетчик числа принимаемых бит. Выдается в линию короткий импульс запроса и выдерживается пауза 8 мкс. Переписывается состояние порта во временный регистр и опрашивается флаг девятого бита. Если принимается не девятый бит, то проверяется на ноль бит временного регистра, который переписан с порта приема данных. По его значению устанавливается бит переноса С регистра STATUS. Сдвигом вправо регистра приема LSB бит переноса переписывается в его старший бит. Выдерживается пауза длительностью 60 мкс, и проверяется флаг девятого бита. Если принимается не девятый бит, то декрементируется счетчик, проверяется на ноль и прием данных повторяется. Если приняты все восемь бит и счетчик пуст, то устанавливается флаг

девятого бита. После приема девятого бита его значение не записывается в регистр приема, а по нему устанавливается флаг знака.

Если знак температуры отрицательный, то регистр приема LSB переводится в дополнительный код (инвертируется и прибавляется единица). Если знак измеряемой температуры положительный, то программа переходит к перекодировке температуры в двоично-десятичный код. Необходимо заметить, что младший бит регистра приема несет информацию о десятых значениях температуры. Если бит равен единице, то десятые равны 0,5, а если бит нулевой — 0,0. После записи десятых в регистр индикации регистр приема сдвигается на один разряд вправо. В таком виде значение температуры передается на перекодировку.

В результате выполнения программы на выходе микроконтроллера имеется информационное слово (рис. 4), которое необходимо передать с помощью БСПИ.

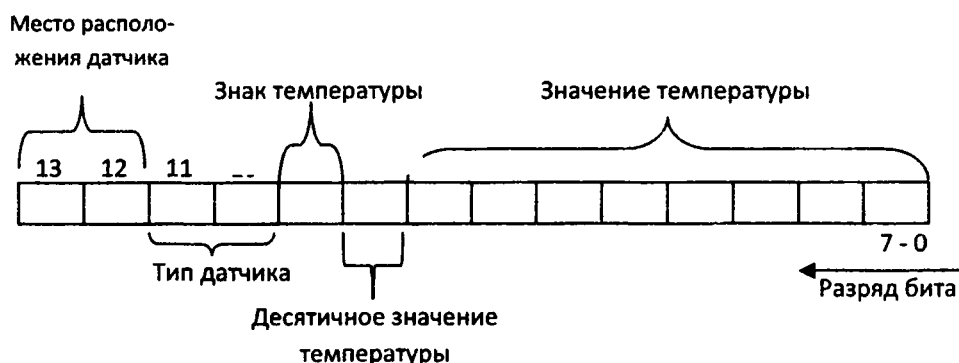


Рис. 4. Структура выходного информационного слова

В данной работе написана программа для микроконтроллера PIC16F84A, которая преобразует полученные данные от датчиков температуры DS1820 в информационное слово, которое включает в себя:

- уникальное имя датчика (идентификацию датчика);
- значение температуры и знак температуры в заданных зонах измерения;
- подтверждение работоспособности системы (самодиагностика).

В результате сформированное информационное слово передается с помощью БСПИ потребителю.

Для написания данной программы использовалась ИСР MPLAB версии 7.0 от фирмы Microchip, а также встроенный в нее отладчик и имитатор. ИСР MPLAB 7.0 — это интегрированная среда разработки, которая может быть выгружена бесплатно с веб-сайта фирмы Microchip. MPLAB содержит все программные инструментальные средства, необходимые для того, чтобы написать программу на Ассемблере, ассемблировать ее, выполнить на имитаторе ее тестирование и, наконец, загрузить программу в программатор. MPLAB состоит из ряда отдельных компонентов, которые работают вместе, чтобы создать завершенную среду разработки. Это следующие компоненты:

- Текстовый редактор. Он обеспечивает возможность ввода исходного текста похожую как в Notepad.
- Менеджер проекта. Один из способов разработки программ в MPLAB — это создание проекта. Проект MPLAB группирует все файлы, относящиеся к одному проекту, вместе.
- Ассемблер MPASM и компоновщик.
- Программный имитатор и отладчик. Программный имитатор позволяет тестировать программу, которая находится в стадии разработки. Это тестирование выполняется посредством ее запуска на ЦП, который имитируется хост-компьютером.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М., Сунка В.Я. Микроконтроллерная широкополосная самодиагностирующаяся сенсорная система измерения уровня жидкостей. Межд. н.-т. ж. Теоретическая и прикладная

механика.-2009, вып. 24.- 117-124с. 2. Колешко В.М., Сунка В.Я., Польшкова Е.В., Ведмич В.В. Интеллектуальная система распознавания информационных образов с поддержкой стандартов беспроводной связи. 19-ая межд. конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии.- 2009, Севастополь, Украина.-382-383с. 3. Заец Н.И. Радиолобительские конструкции на PIC-микроконтроллерах. Книга 2 - М.: "СОЛОН-Пресс", 2005.-192с. 4. Уилмсхерст Т. Разработка встроенных систем с помощью микроконтроллеров PIC. Принципы и практические примеры. - Пер. с англ. - К.: "МК-Пресс" - СПб:"КОРОНА-ВЕК", 2008. - 544с. 5. [Электронный ресурс] / Официальный сайт Microchip; Режим доступа: <http://www.microchip.ru/>, - свободный. – Загл. С экрана. – Яз. Рус.-2010.

УДК 681. 586: 681.316. 1

Колешко В.М., Сунка В.Я., Кутковский В.Д.

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Микроконтроллеры являются законченными специализированными микропроцессорами, ориентированными на реализацию устройств управления, встраиваемую в электронную аппаратуру широкого спектра назначения. Они могут использоваться не только для создания простейших устройств управления, но и для создания достаточно сложных локальных и распределенных комплексов промышленной автоматики.

Наиболее распространенным представителем семейства микроконтроллеров являются 8-разрядные приборы, широко используемые для управления реальными объектами, где применяются, в основном, алгоритмы с преобладанием логических операций, скорость обработки которых практически не зависит от разрядности процессора.

При модульном принципе построения все микроконтроллеры одного семейства содержат процессорное ядро, одинаковое для всех микроконтроллеров данного семейства, и изменяемый функциональный блок, который отличает микроконтроллеры разных моделей. Структура модульного микроконтроллера приведена на рис. 1.

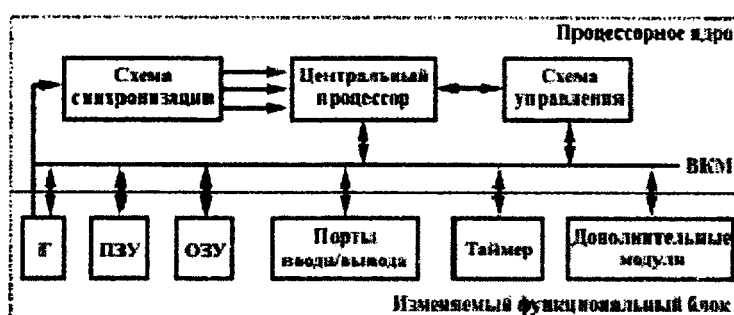


Рис. 1. Модульная организация МК

Микроконтроллер является микросхемой которая в ответ на внешние электрические сигналы действует в соответствии с возможностями заложенными производителем, электроникой подключенной к МК, программой которая в него загружена. Программа для микроконтроллера — это набор кодов, который записывается в программную память. Программирование в кодах неудобно. Поэтому для написания программ используются языки программирования, в которых каждая команда соответствует тому или иному коду. Язык программирования имеет свой словарь (набор слов) и правила их написания. В качестве слов выступают: команды (операторы); специальные управляющие слова; назва-

ния регистров; числовые выражения. Главная задача языка — однозначно описать последовательность действий, которую должен выполнить микроконтроллер.

В процессе создания программы пишется ее текст на компьютере. Затем запускается специальная программа — транслятор, которая переводит текст, написанный программистом, в машинные коды, то есть в форму, понятную для микроконтроллера. Именно этот код записывается в программную память микроконтроллера. Для записи результирующего кода в программную память применяются специальные устройства — программаторы.

Все языки программирования делятся на две группы: языки низкого уровня (машиноориентированные); языки высокого уровня.

Примером языка низкого уровня является язык Ассемблер. Каждый оператор этого языка - это, по сути, словесное название какой-либо конкретной команды микроконтроллера. В процессе трансляции такая команда просто заменяется кодом операции. Составляя программу на языке Ассемблер, программист должен оперировать теми же видами данных, что и сам процессор, то есть байтами и битами. Поэтому, если микроконтроллеры имеют разную систему команд, то и язык Ассемблер для каждого микроконтроллера будет свой.

Языки высокого уровня оперируют не с байтами, а с десятичными числами, переменными, константами. Примером языка низкого уровня является язык C, Basic, Pascal. Транслятор с языка высокого уровня производит более сложные преобразования, чем транслятор с Ассемблера. Но в результате получается программа в машинных кодах. При этом транслятор использует все ресурсы микроконтроллера по своему усмотрению. В каких именно регистрах или ячейках памяти будут храниться значения переменных, по каким алгоритмам будут вычисляться математические функции решает транслятор. Поэтому задача эффективности алгоритма полученной в результате трансляции программы целиком ложится на программу-транслятор. В целом, программы, написанные на языках высокого уровня, занимают в памяти микроконтроллера объем на 30—40 % больший, чем аналогичные программы, написанные на языке Ассемблер. Однако если микроконтроллер имеет достаточно памяти и для 8-ми разрядного контроллера, проще написать на ассемблере, а для сигнального процессора со сложной системой команд, программировать надо к примеру на языке C. Язык C был специально разработан для системного программирования. Этот язык очень компактный, а возможности его велики. Основной принцип стилистики программирования - простота и прозрачность кода. Программа должна быть написана таким образом, чтобы ее можно было легко расширить и дополнить новыми функциями.

Факторы, влияющие на особенности программирования: запас по быстродействию, то это увеличение программы — не проблема. Преимуществом же языков высокого уровня является существенное ускорение процесса разработки программы.

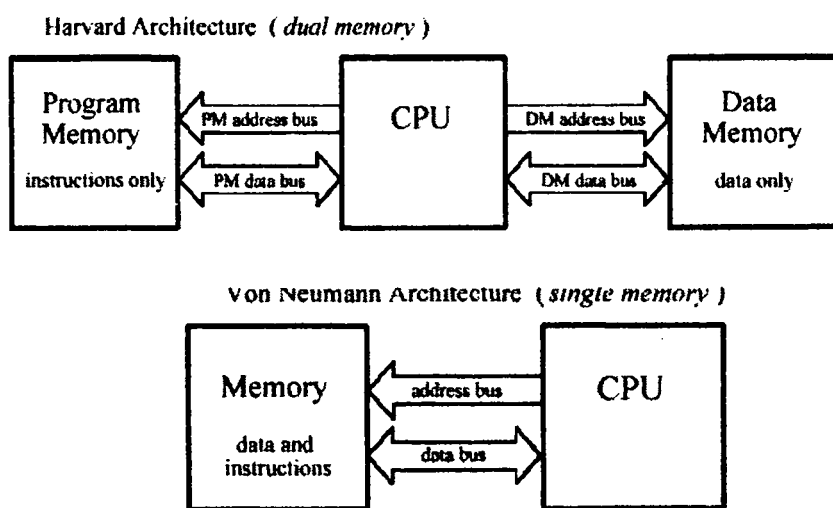


Рис. 2. Архитектуры микроконтроллеров

При выборе языка программирования, нужно руководствоваться: задачей программы - низкоуровневые вещи (управление внешними периферийными устройствами, формирование временных

диаграмм, критический по времени код) лучше писать на ассемблере, а высокий уровень (математические вычисления, общая логика программы) реализовывать на языках высокого уровня. В зависимости от сложности программируемого устройства - небольшую программу

- Простота и эффективность программирования обуславливается набором команд, объемом памяти, линейной организацией памяти данных и памяти программ, наличием программного доступа к стэку.
- Производительность микроконтроллера напрямую связана с его архитектурой. Микроконтроллеры строятся на базе двух известных архитектур. Это архитектура Неймана и Гарвардская архитектура.
- Как видно из рисунков, в архитектуре Неймана одна общая шина для памяти программ и памяти данных. Так для выполнения операции умножения требуется 3 такта : 1 - извлечение кода команды, 2 - извлечение первого операнда, 3 - извлечение второго операнда. В Гарвардской архитектуре имеется две шины. Одна шина - для извлечения кода команды, другая шина - для извлечения данных. В этом случае для той же самой операции потребуется только 2 такта, потому что извлечение кода команды и первого операнда может происходить одновременно.
- Производительность и функциональность микроконтроллера определяется не только ядром, но и набором периферийных модулей. Это таймеры - счетчики, интерфейсные модули, АЦП, ЦАП, модули фиксации (capture modules), порты ввода/вывода, сторожевые таймеры, встроенные супервизоры, встроенные генераторы и т.д. Наличие периферийных устройств позволяет многие вещи делать на аппаратном уровне, освобождая ядро для других задач.
- В некоторых проектах предъявляются жесткие требования по энергопотреблению. Чем больше кварцевая частота, тем больше микроконтроллер будет потреблять тока. У микроконтроллеров есть энергосберегающие режимы. Когда микроконтроллер находится в одном из таких режимов, тактирование его ядра прекращается, и он входит в "спящий" режим (idle state или sleep mode). В этом режиме выполнение программы прекращается, но содержимое всех регистров и ячеек ОЗУ сохраняется неизменным. Вывести микроконтроллер из "спящего" режима, может событие, не связанное с кварцевой частотой тактирования. При проектировании подобных систем приходится искать компромисс между производительностью и энергопотреблением. Поэтому программа должна обеспечить необходимую функциональность и уложиться в требования по энергопотреблению.

Основные типы микроконтроллеров

Микроконтроллеры фирмы Atmel – типа AVR

Микроконтроллеры типа AVR имеют гарвардскую архитектуру (программа и данные находятся в разных адресных пространствах) и систему команд, близкую к идеологии RISC. Процессор AVR имеет 32 8-битных регистра общего назначения, объединённых в регистровый файл.

Система команд микроконтроллеров типа AVR весьма развита и насчитывает в различных моделях от 90 до 133 различных инструкций. Большинство команд занимает только 1 ячейку памяти (16 бит) и выполняется за 1 такт.

Множество команд микроконтроллеров AVR можно разбить на несколько групп: команды логических операций, команды арифметических операций и команды сдвига, команды операции с битами, команды пересылки данных, команды передачи управления, команды управления системой.

Стандартные семейства микроконтроллеров:

- TinyAVR, Флеш-память 8 Кб, SRAM 512 б, EEPROM 512 б; Число линий В/В 6-18 (общее количество выводов 8-32); Ограниченный набор периферийных устройств.
- MegaAVR: Флеш-память 256 Кб, SRAM 8 Кб, EEPROM 4 Кб; Число линий В/В 23-86 (общее количество выводов 20-100); Аппаратный умножитель; Расширенная система команд и периферийных устройств.
- XMEGA AVR: Флеш-память 384 Кб, SRAM 32 Кб, EEPROM 4 Кб; Четырёхканальный DMA-контроллер; Инновационная система обработки событий.

Микроконтроллеры фирмы Microchip – PIC

Микроконтроллеры PIC содержат RISC-процессор с симметричной системой команд, позволяющей выполнять операции с любым *регистром*, используя произвольный метод *адресации*. Пользователь может сохранять результат операции в самом *регистре*-аккумуляторе или во втором *регистре*, используемом для операции.

В настоящее время компания Microchip выпускает пять основных семейств 8-разрядных RISC-микроконтроллеров, совместимых снизу вверх по программному коду:

- PIC12CXXX – семейство микроконтроллеров, выпускаемых в миниаторном 8-выводном исполнении. Эти микроконтроллеры выпускаются как с 12-разрядной (33 команды), так и с 14-разрядной (35 команд) системой команд. Содержат встроенный тактовый генератор, таймер/счетчик, сторожевой таймер, схему управления прерываниями. В составе семейства есть микроконтроллеры со встроенным 8-разрядным четырехканальным АЦП. Способны работать при напряжении питания до 2,5 В;
- PIC16C5X – базовое семейство микроконтроллеров с 12-разрядными командами (33 команды), выпускаемое в 18-, 20- и 28-выводных корпусах. Представляют собой простые недорогие микроконтроллеры с минимальной периферией. Способность работать при малом напряжении питания (до 2 В) делает их удобными для применения в переносных конструкциях. В состав семейства входят микроконтроллеры подгруппы PIC16HV5XX, способные работать непосредственно от батареи в диапазоне питающих напряжений до 15 В;
- PIC16CXXX – семейство микроконтроллеров среднего уровня с 14-разрядными командами (35 команд). Наиболее многочисленное семейство, объединяющее микроконтроллеры с разнообразными периферийными устройствами, в число которых входят аналоговые компараторы, АЦП, контроллеры последовательных интерфейсов SPI, USART и I2C, таймеры-счетчики, модули захвата/сравнения, широтно-импульсные модуляторы, сторожевые таймеры, супервизорные схемы и так далее;
- PIC17CXXX – семейство высокопроизводительных микроконтроллеров с расширенной системой команд 16-разрядного формата (58 команд), работающие на частоте до 33 МГц, с объемом памяти программ до 16 Командных слов. Кроме обширной периферии, 16-уровневого аппаратного стека и векторной системы прерываний, почти все микроконтроллеры этого семейства имеют встроенный аппаратный умножитель 8x8, выполняющий операцию умножения за один машинный цикл. Являются одними из самых быстродействующих в классе 8-разрядных микроконтроллеров;
- PIC18CXXX – семейство высокопроизводительных микроконтроллеров с расширенной системой команд 16-разрядного формата (75 команд) и встроенным 10-разрядным АЦП, работающие на частоте до 40 МГц. Содержат 31-уровневый аппаратный стек, встроенную память команд до 32 Командных слов и способны адресовать до 4 Кбайт памяти данных и до 2 Мбайт внешней памяти программ. Расширенное RISC-ядро микроконтроллеров данного семейства оптимизировано под использование нового Си-компилятора.

Из программных средств отладки наиболее известны и доступны различные версии ассемблеров, а также интегрированная программная среда MPLAB.. Выпускаются как специализированные программаторы, такие как PICPROG, программирующие почти весь спектр PIC-микроконтроллеров, так и универсальные: UNIPRO и STEPX, поддерживающие наиболее известные версии PIC-контроллеров.

Микроконтроллеры фирмы Intel

У истоков производства микроконтроллеров стоит фирма Intel с семействами восьмиразрядных микроконтроллеров 8048 и 8051. Архитектура наиболее популярного семейства МК MCS-51 получила свое название от первого представителя этого семейства - микроконтроллера 8051, выпущенного в 1980 году на базе технологии NMOS. Удачный набор периферийных устройств, возможность гибкого выбора внешней или внутренней программной памяти и приемлемая цена обеспечили этому микроконтроллеру успех на рынке.

Основными элементами базовой архитектуры MCS-51 являются: 8-разрядное АЛУ на основе аккумуляторной архитектуры; 4 банка регистров, по 8 в каждом; встроенная память программ 4Кбайт; внутреннее ОЗУ 128 байт; булевый процессор; 2 шестнадцатиразрядных таймера; контроллер последовательного канала (UART); контроллер обработки прерываний с двумя уровнями приоритетов; четыре 8-разрядных порта ввода/вывода, два из которых используются в качестве шины адреса/данных для доступа к внешней памяти программ и данных; встроенный тактовый генератор.

Именно этот микроконтроллер наиболее хорошо известен разработчикам и является популярным средством управления в устройствах самого широкого круга. Имеется множество эмуляторов, отладчиков и программаторов микросхем 8051.

Система команд микроконтроллеров семейства MCS-251 содержит все 111 команд, входящих в систему команд микроконтроллеров семейства MCS-51 ("старые" команды), и, кроме того, в нее входят 157 "новых" команд. Коды некоторых новых команд имеют формат 4 байт. Перед использованием микроконтроллера его необходимо сконфигурировать, т.е. с помощью программатора "прожечь"

конфигурационные байты, определяющие, какой из наборов инструкций станет активным после включения питания. Если установить набор инструкций MCS-51, то в этом случае MCS-251 будет совместим с MCS-51 на уровне двоичного кода. Такой режим называется Binary Mode. Другой режим Source Mode позволяет с максимальной эффективностью использовать расширенные инструкции и достигнуть наибольшего быстродействия, но требует переработки программного обеспечения.

Микроконтроллеры семейства MCS-96 фирмы Intel предназначены для использования в контрольно-измерительных системах и приборах в качестве встраиваемых микропроцессорных устройств. Основными достоинствами микроконтроллеров семейства MCS-96, является:

1. Расширенная разрядная сетка, позволяющая выполнять операции с данными, представленными в формате "байт" (8 бит) и формате "слово" (16 бит), а некоторые операции - в формате "двойное слово" (32 бита);

2. Улучшенная система операций, содержащая операции умножения и деления для чисел со знаком и без знака при разных форматах представления данных, операции сдвига на заданное число разрядов, операции групповой пересылки;

3. Совершенная система команд, имеющая в своем составе двухадресные и трехадресные команды арифметических и логических операций с различными способами адресации, что позволяет создавать компактные и быстродействующие программы;

4. Многообразие расположенных на кристалле периферийных устройств, выполняющих функции ввода и вывода данных, событий и аналоговых сигналов, обслуживания запросов прерывания без остановки текущей программы, контроля правильности функционирования микроконтроллера, что позволяет разрабатывать малогабаритные и надежные устройства с минимальным числом дополнительных микросхем;

5. Наличие большого числа программных и программно-аппаратных средств поддержки разработки аппаратуры на базе микроконтроллеров семейства MCS-96.

ЛИТЕРАТУРА

1. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. / Сост. Ю.А. Шпак, К.: "МК-Пресс", 2006. — 400 с. 2. Самоучитель по микропроцессорной технике. / Белов А.В., СПб.: Наука и Техника, 2003. — 224 с. 3. Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс] / Википедия – свободная энциклопедия, 2010. - Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. 4. Общие рекомендации [Электронный ресурс] " Программирование микроконтроллеров " 2010. - Режим доступа: <http://microdesign.by.ru/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. 5. [Электронный ресурс] / Официальный сайт Microchip; режим доступа <http://www.microchip.ru/>, - свободный – Загл. С экрана. – Яз. Рус. – 2010. 6. [Электронный ресурс] / Официальный сайт Atmel; режим доступа <http://www.atmel.ru/>, - свободный – Загл. С экрана. – Яз. Рус. – 2010. 7. [Электронный ресурс] / Официальный сайт Intel; режим доступа <http://www.intel.ru/>, - свободный – Загл. С экрана. – Яз. Рус. – 2010.

УДК 621.317.353.3; 620.171; 621.3.087; 621.43-61

Колешко В.М., Сунка В.Я., Шиманович А.В., Левый Ю.В., Грибовский В.О.

ЭКСПРЕСС АНАЛИЗАТОР МОТОРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Качество бензина и дизельного топлива – определенная совокупность физико-химических свойств нефтепродуктов, зависящих как от химического состава (плотности, вязкости, температуры: кипения, замерзания, вспышки, самовоспламенения и т. д.), так и внешних условий (содержание твердых частиц, санкционированного и «несанкционированного» разбавления топлива жидкими и порошкообразными добавками и т. д.). Качество бензинов, масел и дизтоплива определяется сложной системой количественных показателей, достаточно полно

прописанной в соответствующих межгосударственных ГОСТ и национальных государственных стандартах.

Современная техника предъявляет все более жесткие требования к эксплуатационным свойствам нефтепродуктов [1,2]. С другой стороны, к сожалению, расширяется «отрасль» по несанкционированному введению в моторное топливо, хранящееся на базах и поступающее на автозаправочные станции (АЗС) для реализации, все возможных химических жидкостных и сухих порошкообразных или таблеточных «добавок» с целью «необоснованного (не действительного)» повышения октанового числа (ОЧ). Последнее выполняется с целью либо прямого воровства либо получения необоснованной прибыли на заниженном качестве автомобильного моторного топлива. Поэтому необходимо ужесточить и наладить оперативный все охватывающий контроль качества моторного топлива находящегося в сети продажи - на АЗС и на базах хранения.

Для контроля соответствия автомобильного топлива требованиям ГОСТ 2084-77, ГОСТ 511-82, ГОСТ 305-82, СТ СЭВ 2243-80, СТБ ЕН 12177-2005 и др. используют общеизвестные методы: измерение химического состава, дающее детальную информацию о спектральном составе топлива, и контроль октанового (бензины) или цетанового (дизельное топливо) (ОЧ или ЦЧ) числа топлива с помощью одноцилиндровых установок УИТ-65(85), позволяющий получить информацию о его антидетонационных свойствах. Эти методы требуют больших временных затрат и применения сложного оборудования. Они непригодны для оперативного контроля параметров непосредственно в технологическом процессе производства топлива или экспресс-анализа. Показателем детонационной стойкости автомобильных бензинов является ОЧ, показывающее содержание изооктана (в % объема) в смеси с н-гептаном, которая по детонационной стойкости эквивалентна топливу, испытываемому в стандартных условиях. ОЧ бензинов определяют по одному из 3-х лабораторных методов [3]:

- моторным методом при длительной работе двигателя на номинальных нагрузках, в обозначении бензина этот метод не указывается (А-76);

- исследовательским методом определяется детонационная стойкость бензина при неустановившихся режимах (АИ-93, А-автомобильный, И-исследовательский метод определения ОЧ, ОЧ = 93);

- температурным методом оценивают ОЧ высокооктановых авиационных бензинов и высокооктановых компонентов с ОЧ = 90÷115.

ОЧ, определенное моторным методом, обычно ниже ОЧ, измеренное исследовательским методом. Разность значений ОЧ по исследовательскому и моторному методу характеризует чувствительность бензина к режиму работы двигателя.

Наряду со стандартными методами определения ОЧ и ЦЧ в настоящее время получают широкое распространение более быстрые, чем лабораторные, методы, основанные на применении спектральных и хроматографических методик анализа. Однако длительность измерительного процесса и дороговизна оборудования является главными их недостатками.

Наиболее перспективны экспресс-методы определения ОК и ЦЧ автомобильного моторного топлива, в основу которого положен принцип оценки качества моторного топлива по определению физических свойств бензинов и примесей в них, что повышает производительность измерений в 25-30 раз.

Известны различные методы и устройства, основанные на измерении электрофизических параметров (диэлектрической проницаемости или/и тангенса угла диэлектрических потерь) с применением радиоволновых низкочастотных (НЧ), высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) резонаторов, содержащих контролируруемую жидкость. На рис. 1 представлена зависимость ОЧ (ЦЧ) бензинов от значения их диэлектрической проницаемости, из которой очевидно, что для реальных моторных топлив изменение величины ОЧ (ЦЧ) составляет максимум 2- 3 раза, что соответствует изменению величины диэлектрической проницаемости всего на 5÷7 %. Столь малый диапазон изменения диэлектрической проницаемости накладывает чрезвычайно жесткие условия к стабильности и точности работы автогенераторов, являющихся основной частью измерителей ОЧ (ЦЧ) моторного топлива – октанометров. С целью повышения метрологических и эксплуатационных параметров октанометры, безусловно, должны работать в диапазоне ВЧ или СВЧ частот.

Сущность метода заключается в измерении рабочей частоты автогенератора с LC -резонатором (кювета), заполненным анализируемым моторным топливом, и в последующем определении ОЧ (ЦЧ) по экспериментальным зависимостям измеренной частоты. В настоящее время существует два экспресс-метода измерения параметров автомобильного топлива:

- по зависимости ОЧ (ЦЧ) моторного топлива от значения полной диэлектрической проницаемости (ϵ);

- метод измерения ОЧ и ЦТ по величине составляющих действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') комплексной диэлектрической проницаемости.

Остановимся на каждом методе более подробно. Одним из основных недостатков измерительных устройств по первому методу является их ограниченная область применения, обусловленная контролем только моторного топлива, являющегося очень хорошим диэлектриком. Если моторное топливо (бензин, дизтопливо) имеет большие диэлектрические (активные) потери, добротность измерительных LC -резонаторов становится малой величиной и погрешность измерений возрастает пропорционально величине активных потерь, определяемых величиной (ϵ'') в контролируемом топливе. При практическом исследовании реальных бензинов установлено, что они обладают существенной удельной активной проводимостью: обычно величина проводимости находится в пределах от 5 до 100 нСм/м, а у некачественных бензинов может достигать $10^3 + 10^5$ нСм / м и более. С учетом этого, измерение диэлектрической проницаемости стандартными методами (различного рода простейшие измерители ёмкости) становится невозможным - все они приводят к существенному завышению значения реальной ёмкости и ОЧ и а, следовательно, и к повышению погрешности измерений. При очень больших значениях активной проводимости происходит срыв работы автогенератора и измерения принципиально невозможны.

Известно устройство, в котором определение ОЧ моторного топлива ведется по первому методу измерения полной диэлектрической проницаемости, при этом для повышения точности измерений введена компенсация значения ОЧ (ЦЧ) по температуре и плотности топлива [4]. Для обратной связи параллельно конденсатору (кювета с топливом) вводятся два варикапа, управляющие входы которых соединены соответственно с выходом датчика температуры и датчика плотности. Решение по построению измерительной системы хорошее, однако дополнительно в резонатор в данном варианте вводятся активные потери двух, параллельно включенных, варикапов, что приводит к завышению реальной ёмкости резонатора (кюветы), а значит к увеличению погрешности измерения ОЧ или ЦЧ.

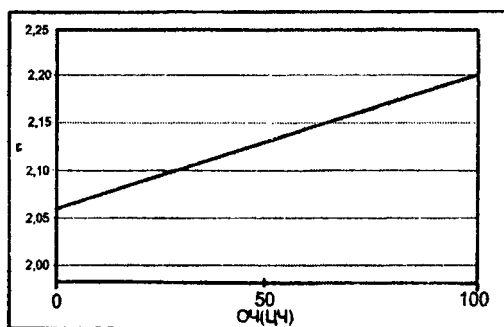


Рис. 1. Зависимость величины ОЧ от значения резонатора на эталонном (1) и контролируемом (2) топливе

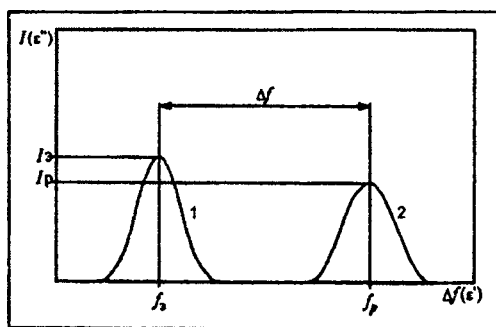


Рис. 2. АЧХ проводимости диэлектрической проницаемости

По второму методу разработано устройство [5], в котором отдельно определяются действительная (ϵ') и мнимая (ϵ'') составляющие комплексной диэлектрической проницаемости моторного топлива как образцового, заливаемого в эталонный резонатор, так и контролируемого топлива, заливаемого в измерительный резонатор. Происходит непосредственное сравнение параметров эталонного и реального топлива, по результатам обработки которых находят ОЧ или ЦЧ исследуемого топлива. Измерение составляющих комплексной диэлектрической про-

ницаемости основано на анализе амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) токов (напряжений) в колебательных LC - контурах с эталонным и измерительным резонаторами (рис. 2, зависимости 1 и 2). По максимумам токов АЧХ определяется частота резонанса (по действительной составляющей проницаемости (ϵ')), а по величине максимумов АЧХ – мнимая (активная) составляющая комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ''). Недостаток этого метода – отсутствие поправок на значение вязкости, плотности и температуры контролируемого моторного топлива.

В разработанном авторами приборе (рис.3) учтены недостатки указанных выше методов и предложенный способ определения ОЧ этилированных и неэтилированных бензинов или ЦЧ дизельного топлива, наиболее близок к методу, изложенному в [5]. По этому методу измеренное значение числа ОЧ (ЦЧ) равно $N = \sum \epsilon^n(\alpha_i) + b_p + c_T + d_\eta$, одновременно производится корректировка величины N по изменяющимся величинам плотности, температуры и вязкости (при контроле моторных топлив при низких температурах) Здесь приняты следующие обозначения: ϵ - диэлектрическая проницаемость, ρ – плотность (г/см^3), T – температура ($^{\circ}\text{C}$), η - динамическая вязкость ($\text{Па}\cdot\text{с}$); при этом - $\epsilon^n(\alpha_i) = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ и b, c, d - постоянные коэффициенты, определяемые при калибровке. В качестве информационного параметра используют диэлектрическую проницаемость ϵ , при этом в процессе измерения диэлектрической проницаемости анализируемой пробы дополнительно замеряют значение температуры, вязкости и плотности пробы и окончательный результат ОЧ корректируется по этим дополнительным измерениям. Перед измерениями в кювету (измерительный резонатор) заливается эталонное топливо и АЧХ тока (напряжения) на измерительном LC -резонаторе, в полосе его пропускания, заносится в ПЗУ микроконтроллера (МК) как эталон для последующего сравнения с ним АЧХ реальных образцов моторного топлива. Прибор относится к группе автоматизированных анализаторов по ГОСТ 16851-71.

Описание работы по блок-схеме

После включения питания прибора (рис.3) производится автоматическая самодиагностика. После ее окончания выводится на экран информация о готовности к работе (или обнаруженной неисправности). После получения сигнала о начале измерения (нажатие кнопки или получение сигнала от компьютера) с выхода микроконтроллера (МК) подается код на вход цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) блока управления частотой управляемого генератора 8, который генерирует выходной сигнал в виде медленно изменяющегося (пилообразного) напряжения. Далее это напряжение подается на управляемый генератор 7 синусоидального сигнала высокой частоты (ВЧ). ВЧ напряжение поступает в измерительный LC -резонатор 6 – кювету с контролируемым топливом. С выхода измерительного резонатора 6 ВЧ напряжение подается на смеситель 11, где смешивается с ВЧ напряжением генератора опорной частоты 12. Частотно модулированное напряжение поступает на полосовой фильтр (ПФ) нижних частот 15, где из смеси сигналов выделяется напряжение разностной частоты в диапазоне $f \sim (50 \div 110)$ МГц. Затем эта частота измеряется цифровым частотомером 16, с выхода которого код о частоте передается в основной МК центрального пункта управления (ЦПУ) 13.

Основу блока обработки информации составляет МК типа Atmega 32-16би фирмы Atmel, обладающий большим количеством периферийных устройств и достаточной оперативной и запоминающей памятью. Он выполняет функции основного устройства контролирующего работу октанометра и выполняющего обработку и анализ полученной информации.

Основой блока управления частотой управляемого генератора 8 является высокоточный 10 битный ЦАП, подключенный к МК блока обработки информации по шине I²C. ЦАП обладает собственным буфером и воспроизводит последнее записанное значение напряжения до поступления сигнала о следующем уровне напряжения, что позволяет МК блока обработки информации переключаться на другую задачу (обработка результатов измерения, выполнение расчетов и т.д.) и не тратить при этом вычислительную мощность на генерацию управляющего сигнала.

Управляемый генератор 7 и генератор опорной частоты 12 представляют собой интегральные генераторы управляемые напряжением (ГУН) с плавным изменением частоты в рабочем диапазоне изменения частот от ~ 50 до 975 МГц. Основное отличие между ними в том, что на генератор опорной частоты 12 подается строго фиксированное управляющее напряжение, в то время как

вход управляемого генератора 7 подключен к выходу ЦАП блока 8 и управляется его выходным напряжением.

Измерительный резонатор представляет собой колебательный LC – контур, состоящий из катушки индуктивности с высокой добротностью (200÷500) и электрической емкости кюветы, соединенных параллельно (последовательно). Кювета (емкость цилиндрической формы) заполняется исследуемой жидкостью - моторным топливом, параметры которой подлежат определению. Одной из обкладок конденсатора служит покрытая металлическим напылением внутренняя стенка кюветы, а другой обкладкой служит металлический камертон, закрепленный на дне кюветы (он же измеритель плотности и вязкости).

Блок 11 состоит из смесительного диода и полосового фильтра низких частот 15. Основная задача данного устройства смешать частоты опорного 12 и управляемого генераторов 7 и выделить напряжение разностной частоты сигнала, для последующего его усиления и анализа в блоке измерения частоты.

Блок 16 необходим для измерения разностной частоты в диапазоне $f \sim (50 \div 110)$ МГц, получаемого с ПФ фильтра низких частот 15, для последующей обработки и преобразования в МК ЦПУ с целью получения значения ОЧ (ЦЧ) по величине действительной части (ϵ) комплексной диэлектрической проницаемости контролируемого топлива. Принцип измерения частоты основан на время - импульсном методе подсчета количества пришедших на счетчик импульсов за 1 секунду. После измерения разностной частоты ее значение передается в главный МК ЦПУ.

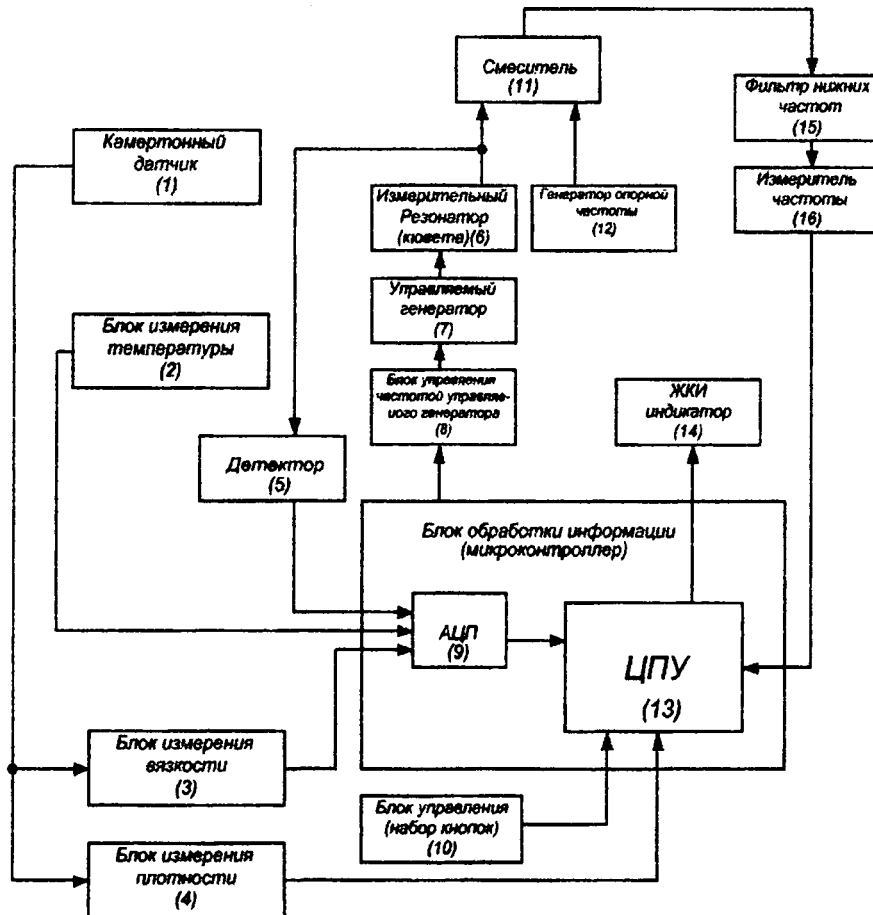


Рис. 3. Блок-схема октанометра

Блок измерения 2 определяет температуру контролируемой жидкости для использования ее значения для последующей коррекции показаний величины ОЧ (ЦЧ). Чувствительным элементом в этом блоке является терморезистор, который находится в кювете с жидкостью. Для дополнительной линейризации передаточной функции в схему последовательно включен прецизионный

резистор с очень маленьким значением температурного коэффициента электрического сопротивления. Сигнал с терморезистора усиливается в ~ 50 раз не инвертирующим усилителем и подается на вход встроенного в МК аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 9.

Блок 3 позволяет измерить вязкость исследуемого моторного топлива по амплитуде выходного сигнала камертона 1. Он состоит из вибрирующего камертона 1 с частотой $\sim 150 \div 250$ Гц, автогенератора, буферного усилителя и детектора выпрямляющего переменного напряжения в постоянное напряжение, которое подается на АЦП 9 МК блока обработки информации.

Блок 4 позволяет измерить зависимость плотности исследуемой жидкости по частоте выходного сигнала камертона 1. Он состоит из входного усилителя, триггера Шмидта, который преобразует синусоидальный сигнал в прямоугольной формы импульсы с короткими фронтами. МК ЦПУ измеряет частоту в диапазоне $\sim 150 \div 250$ Гц время - импульсным методом подсчета количества пришедших на счетчик импульсов за 1 секунду с помощью внутреннего счетчика и таймера. После чего сигнал передается основному МК через интерфейс его порта ввода - вывода.

ЖКИ индикатор представляет собой знаковосинтезирующий дисплей на основе контроллера HD44780 (или совместимого с ним KS0066). В настоящее время они де-факто являются промышленным стандартом на рынке встраиваемых систем. В приборе используется ЖКИ с разрешением 16×2 , но возможно использование и других типов (модификации 8×1 , 20×4 , 40×4 и др.) в зависимости от условий использования октанометра и требований индикации информации для пользователя.

Конструктивно октанометр типа «БелОК-01» состоит из измерительной кюветы (резонатор) и электронного блока. На передней панели электронного блока расположены кнопки управления экспресс-анализатором - «Калибровка», «Измерение» «Сброс», «Применить», «Отмена» и др. При взятии проб контролируемой жидкости предусмотрена возможность выдавливания части жидкости для устранения пузырьков воздуха. Питание анализатора осуществляется от четырех компактных батарей типа АА.

Предварительно до начала эксплуатации в память МК октанометра «БелОК-01» записывается полная АЧХ напряжения на измерительном LC-резонаторе, определяются все необходимые параметры эталонных жидкостей (ОЧ или ЦЧ, температура, плотность, вязкость) для последующего сравнения их с измеряемыми аналогичными параметрами реальных жидкостей.

Процесс проведения измерений и калибровки

1. Включение питания.
2. Ожидать появления сигнала о готовности (появление надписи «готов к измерению» на дисплее), свидетельствующей о проведенном предварительном тестировании электронного блока прибора без наличия измеряемой жидкости в кювете.
3. Заполнить кювету 6 эталонной жидкостью - бензином или дизельным топливом.
4. При нажатии кнопки «Сброс» МК октанометра выполняет очистку своей энергонезависимой памяти от ранее сохраненных характеристик жидкостей.
5. При нажатии кнопки «Измерение» определяются все необходимые параметры эталонных жидкостей и записываются в энергонезависимую память. Для повышения точности измерений МК ЦПУ организует измерение не менее 5 раз, каждый раз заносит результаты измерений в память микроконтроллера, а затем усредняет их.
6. Микроконтроллер сохраняет введенные пользователем данные в энергонезависимой памяти.
7. По команде пользователя нажатием кнопок «Сброс» и «Калибровка» перезагружаем микроконтроллер, после чего он готов к выполнению следующего цикла измерений.
8. Промыть кювету 6 от эталонной жидкости и заполнить реальной измеряемой жидкостью.
9. При нажатии кнопки «Измерение» происходит процесс измерения, а затем и определения электрофизических параметров контролируемой жидкости. Измерение выполняется аналогично п.5 не менее 5 раз с последующим усреднением результатов измерений.

10. Пользователь сопоставляет измеренные значения параметров топлив с сохраненными в памяти октанометра названиями эталонных марок топлива нажатием кнопки «Применить».
11. Для следующего измерения необходимо на той же жидкости или новой контролируемой жидкости заданного типа жидкостей начать новый цикл нажатием кнопки «Измерение».
12. Процесс измерения как эталонных, так и реально контролируемых моторных топлив происходит одинаково и состоит в следующей последовательности электронных операций.
13. После нажатия кнопки «Измерение» МК блока обработки информации через шину I²C начинает подавать цифровой код на блок управления 8.
14. Выходное напряжение ЦАП блока управления 8 подается на управляемый генератор синусоидального напряжения 7, изменяя его частоту от 10 до 975 МГц.
15. Выходной сигнал генератора 7 усиливается до необходимой величины и затем подается на измерительный резонатор 6 (кювету с контролируемой жидкостью).
16. Напряжение с измерительного резонатора 6 (последовательный LC- контур), пропорциональное току через резонатор поступает на смеситель 11.
17. В смесителе 11 происходит частотная модуляция (смешивание) частоты напряжения с измерительного резонатора 6 напряжением частоты опорного высокочастотного генератора 12.
18. После смешивания с опорным сигналом в смесителе, напряжение спектра частот подается на активный полосовой фильтр нижних частот 15, где выделяется разностная частота несущего и опорного ВЧ сигналов.
19. Одновременно происходит процесс измерения величины напряжения на резонансном контуре 6. Для чего это напряжение преобразуется детектором 5 в постоянное напряжение, которое через АЦП 9 подается в блок обработки информации для записи в ОЗУ. Также и измеренное значение разностной частоты с частотомера 16 записываются в ОЗУ для последующего анализа. Запись значений этих двух параметров происходит при каждом значении выходного кода ЦАП блока управления частотой 8. Таким образом, в ОЗУ записываются по точкам вся АЧХ (рис. 2) тока через резонатор в полосе его пропускания, нагруженного контролируемой жидкостью, от максимума АЧХ до уровня 0,4 слева и справа относительно максимума АЧХ частоты.
20. Для определения частоты резонанса автогенератора, т. е. максимумов АЧХ тока (напряжения) на резонансном контуре с эталонной или реальной жидкостью (рис. 2, зависимости 1,2) МК ЦПУ после записи полной АЧХ выполняет анализ полученной АЧХ тока. Определяются максимальное значение экстремума АЧХ тока I_s (эталонная жидкость) и тока I_p (реальная жидкость), а также значения резонансных частот, соответствующих этим экстремумам - f_s (эталонная жидкость) и f_p (реальная жидкость). Т.о. происходит определение резонансных частот f_s и f_p по экстремуму АЧХ, т.е. по значениям действительной части (ϵ') комплексной диэлектрической проницаемости контролируемой эталонной и реальной жидкости. Значения этих частот калибруется затем МК ЦПУ в соответствующие значение ОЧ или ЦЧ. По значениям экстремумов АЧХ тока I_s (эталонная жидкость) и тока I_p (реальная жидкость), т. е. по значениям мнимой части (ϵ'') комплексной диэлектрической проницаемости, определяются активные потери (сопротивление или проводимость) в контролируемой жидкости. Затем вносятся коррективы в определение значения ОЧ (ЦЧ) контролируемой жидкости по величине ее активных потерь.
21. Непрерывно после начала измерения (нажатия кнопки »Измерение») идет процесс измерения температуры, плотности и вязкости соответственно блоками 1; 2; 3 и 4. Выходные постоянные напряжения с блоков температуры 2 и вязкости 3 через АЦП вводятся в ОЗУ блока обработки информации. Измеренное время импульсным методом значение частоты, пропорциональное плотности контролируемой жидкости с блока 4, также вводится в ОЗУ блока обработки информации. Затем эти значения с помощью МК вводятся для корректировки значений ОЧ или ЦЧ.
22. Результаты полученных измеренных и расчетных значений октанового или цетанового числа, температуры, плотности и вязкости выводится на ЖКИ дисплей.

23. По команде пользователя нажатием кнопок «Сброс» и «Калибровка» перезагружаем микроконтроллер, после чего он готов к выполнению следующего цикла измерений.

Рекомендуется для применения на АЗС, нефтебазах, НПЗ, таможенных и т. д. как портативное универсальное устройство для оперативного контроля качества моторного топлива.

Таблица 1. Основные технические характеристики

Параметр	Значение
Моторное топливо - бензины и дизельные топлива всех марок	
Диапазон октановых чисел, ед. ОЧ	40-120
Диапазон цетановых чисел, ед. ЦЧ	20-100
Погрешность измерения, %	0,4(ОЧ), 0,8(ЦЧ)
Рабочий температур. диапазон	- 30 + + 50 °С
Время непрерывной работы, час	20
Продолжение таблицы 1	
Наработка на отказ, час	5000
Габариты, мм	
Сенсор-кювета	40x40x100
Электронный блок	100x80x40
Время измерения, с	10
Вес, кг	Не более 0,9
Индикация	Цифровая
Срок службы, лет	не менее 5

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М., Сунка В.Я. Реанимация нефтегазовых скважин. - Минск, БИТА, 1996. - 60с.
2. Колешко В.М., Сунка В.Я. Электронный прибор для измерения плотности-вязкости нефтепродуктов // Материалы, технология, инструменты. 1997, вып. 1. С. 96-99.
3. Митусова Т.Н., Полина Е.В., Калинина М.В. Современные дизельные топлива и присадки к ним.— М.: Издательство «Техника», 2002.
4. Шатохин В.Н, и др. Способ и устройство для определения октановых чисел автомобильных бензинов. Патент на изобр. РФ RU 2100803 С1.
5. Жуков Б.В. СВЧ-диэлектрометр для экспресс-анализа октановых чисел автомобильных топлив // Датчики и системы, 2008, вып. 11. – С.15-17.

УДК 621.316

Курский В.В., Сунка В.Я., Полянкова Е.В.

ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ПЛИС

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

ПЛИС возникли в жесткой конкуренции, при существовании в микроэлектронике двух противоречивых тенденций. С одной стороны, необходимо существенно сократить жизненный цикл изделия для удовлетворения быстро возрастающих требований потребителей. С другой стороны, надо постоянно повышать требования к быстродействию, функциональной сложно-

сти, к снижению потребляемой мощности, надежности и стоимости изделий микро- наноэлектроники. Поэтому необходимо существенно сокращать цикл проектирования так, чтобы на рынке появились все новые изделия микро- наноэлектроники, соответствующие требованиям прогресса времени.

Программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС, англ. *programmable logic device, PLD*) — электронный компонент, используемый для создания цифровых интегральных схем. В отличие от обычных цифровых микросхем, логика работы ПЛИС не определяется при изготовлении, а задается посредством программирования (проектирования). Для программирования используются программаторы и отладочные среды, позволяющие задать желаемую структуру цифрового устройства в виде принципиальной электрической схемы или программы на специальных языках описания аппаратуры Verilog, VHDL, AHDL и др. [1,2].

ПЛИС широко используется для построения различных по сложности и возможностям цифровых устройств различного назначения: микропроцессорная и микроконтроллерная техника, это приложения, где необходимо большое количество портов ввода-вывода (бывают ПЛИС с более чем 1000 выводов («пинов»)), цифровая обработка сигнала (ЦОС), цифровая видео-аудио аппаратура, высокоскоростная передача данных, криптография, проектирование и прототипирование ASIC (*application-specific integrated circuit* — специализированная для решения конкретной задачи интегральная схема), в качестве мостов (коммутаторов) между системами с различной логикой и напряжением питания, реализация нейрочипов.

В настоящее время основными мировыми производителями являются фирмы: Atmel, Altera, Lattice semiconductor, Xilinx, Actel и др. (рис. 1).

Технология ПЛИС

Приборы программируемой логики, яркими представителями которых являются ПЛИС применяются на протяжении нескольких десятилетий для построения разнообразных интерфейсных узлов, устройств управления и контроля и т.д.. Раньше о ПЛИС говорили, в основном, как о МОП ИС недостойных внимания серьезных разработчиков, но с появлением быстродействующих МОП ПЛИС сверхвысокой интеграции, работающих на высоких тактовых частотах, их ниша на мировом рынке значительно расширилась. Современные образцы ПЛИС, выполненные по 0,1- 0,22-микронной технологии, способны работать на частотах до 300 МГц и реализуют до 3 млн. эквивалентных логических вентилях. Компания Xilinx, один из мировых лидеров в данной области, уже объявила о выпуске ПЛИС с 10 млн. логических вентилях. Столь резкое увеличение мощности ПЛИС позволяет использовать их не только для реализации простых контроллеров и интерфейсных узлов, но и для цифровой обработки сигналов, сложных интеллектуальных контроллеров. Разработка быстродействующих МОП ПЛИС со сверхнизким уровнем энергопотребления открывает широкие возможности по их использованию в системах мобильной связи (в частности, непосредственно в сотовых телефонах и пейджерах), в портативных проигрывателях (например, в MP3-проигрывателях) и т.д.

По способам коммутации элементов логических матриц различают следующие классы ПЛИС [1]:

- *программируемые логические матрицы (FPLA)*, состоящие из базовых ячеек типа И и ИЛИ;

- *программируемая матричная логика (PAL)*, содержащая программируемую матрицу И и фиксированную матрицу ИЛИ;

- *программируемые коммутационные матрицы (CPLD)*, содержащие матричные логические блоки, объединенные коммутационной матрицей;

- *программируемые вентиляльные матрицы (FPGA)*, состоящие из логических блоков и коммутационных соединений портов ввода/вывода;

- *конфигурируемые логические блоки (CLB)*, представляющих комбинацию ОЗУ, регистров, функциональных генераторов и др.

По целому ряду причин особый интерес вызывает использование ПЛИС для реализации нейрочипов. Во-первых, разработка проектов на ПЛИС оказывается достаточно быстрой,

занимая всего несколько месяцев. Во-вторых, ПЛИС на сегодняшний день обладают огромными ресурсами, которые могут быть эффективно использованы при реализации нейрочипов [3].

Конфигурируемые процессоры

Одна из проблем, стоящих перед создателями новых вычислительных платформ - поиск компромисса между скоростью и универсальностью. Микропроцессоры общего назначения способны исполнить любой алгоритм. Однако по скорости их нельзя сравнить с заказными интегральными схемами, предназначенными для конкретных приложений (application-specific integrated circuit — ASIC), реализующих те и только те функции, которые необходимы для решения вполне конкретной задачи. При должной настройке ASIC на данную проблему можно получить микросхему, которая будет значительно меньше, дешевле и быстрее, чем универсальный программируемый микропроцессор.

Есть и третий вариант построения ПЛИС, т. е. такие аппаратные схемы, которые могут быть модифицированы практически в любой момент в процессе их использования. Они состоят из конфигурируемых логических блоков, подобных переключателям с множеством входов и одним выходом. В цифровых схемах такие переключатели реализуют базовые двоичные операции И, И-НЕ, ИЛИ, ИЛИ-НЕ и исключающее ИЛИ. В большинстве современных микропроцессоров функции логических блоков фиксированы и не могут модифицироваться.



Рис. 1. Внешний вид ПЛИС фирмы ALTERA

Принципиальное отличие ПЛИС от обычных СБИС состоит в том, что в ПЛИС и функции блоков, и конфигурация соединений между ними могут меняться с помощью специальных сигналов, посылаемых схеме. В некоторых ASIC-микросхемах используются логические матрицы (так называемые Базовые Матричные Кристаллы — БМК), аналогичные ПЛИС по структуре, однако они конфигурируются раз и навсегда в процессе производства путем «прожига», в то время как ПЛИС могут постоянно перепрограммироваться и менять топологию соединений в процессе использования.

ПЛИС представляют собой поля из нескольких тысяч логических вентилях с триггерным блоком памяти и триггерными схемами ввода/вывода. Вентили выполняют функции комбинационной логики, а их соединения между собой и с триггерами формируются при загрузке программы, задающей конфигурацию межсоединений. Один из возможных вариантов ПЛИС представлен на рис. 2.

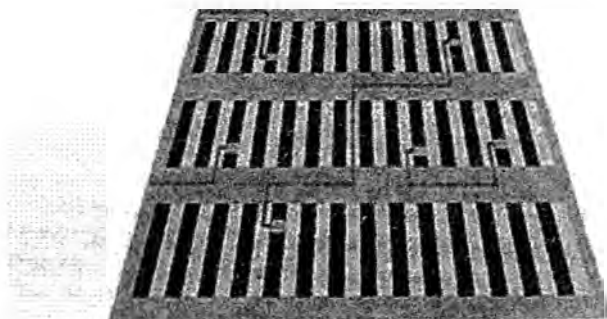


Рис. 2. Поле из логических вентилях

Программируемые контуры на рис. 2, показанные белым в ПЛИС могут создаваться и удаляться посредством электрических сигналов, посылаемых на вход логического элемента.

Идея конфигурируемых микросхем была высказана в конце 60-х, однако распространение ПЛИС получили лишь в 90-е годы.

Во всем мире FPGA часто используют там, где надо быстро вывести на рынок новое устройство со сложными функциями, скажем, сделать новый контроллер, поддерживающий только что появившийся стандарт сотовой связи. Вообще, FPGA это программируемая пользователем вентиляционная матрица - полупроводниковое устройство, которое может быть конфигурировано производителем или пользователем после изготовления; отсюда название: «программируемая пользователем») широко применяют в коммуникационном и сетевом оборудовании

Но не все одинаково полны оптимизма по поводу перспектив FPGA. Например, представители компании Fujitsu по маркетингу заказных интегральных схем в Центральной и Западной Европе, полагают, что рынок FPGA будет постепенно сужаться, уступая «сверху» интегрированным решениям типа system-on-chip (система на кристалле), а «снизу» — полужаказным микросхемам.

В каких же случаях наиболее целесообразно применять ПЛИС.

Во-первых, при разработке оригинальной аппаратуры, а также для замены обычных ИС малой и средней степени интеграции. При этом значительно уменьшаются размеры устройства, снижается потребляемая мощность и повышается надежность. Наиболее эффективно использование ПЛИС в изделиях, требующих нестандартных схемотехнических решений. В этих случаях ПЛИС даже средней степени интеграции (24 вывода) заменяет, как правило, до 10-15 обычных интегральных микросхем. Другим критерием использования ПЛИС является потребность резко сократить сроки и затраты на проектирование, а также повысить возможность модификации и отладки аппаратуры. Поэтому ПЛИС широко применяется в стендовом оборудовании, на этапах разработки и производства опытной партии новых изделий, а также для эмуляции схем, подлежащих последующей реализации на другой элементной базе, в частности БМК. Отдельная область применения ПЛИС - проектирование на их основе устройств для защиты программного обеспечения и аппаратуры от несанкционированного доступа и копирования. ПЛИС обладают такой технологической особенностью, как "бит секретности", после программирования которого схема становится недоступной для чтения (хотя свои функции ПЛИС естественно, продолжает выполнять). Обычно, применение одной-двух ПЛИС средней степени интеграции оказывается вполне достаточной для надежной защиты информации. Наиболее широко программируемые логические ИС используются в микропроцессорной и вычислительной технике. На их основе разрабатываются контроллеры, адресные дешифраторы, логика обрамления микропроцессоров, формирователи управляющих сигналов и др. На ПЛИС часто изготавливают микропрограммные автоматы и другие специализированные устройства, например, цифровые фильтры, схемы обработки сигналов и изображения, процессоры быстрого преобразования функций Фурье и т.д. В технике связи ПЛИС применяются в аппаратуре уплотнения телефонных сигналов. Применение ПЛИС становится актуальным еще и потому, что у разработчиков зачастую нет необходимых разработанных и изготавливаемых стандартных микросхем [4].

Особенности реализации ПЛИС в нейронных сетях

Для начала определим те основные особенности, которые накладывает специфика нейронных сетей на их аппаратную реализацию. Поскольку нейронная сеть представляет собой большое количество одинаковых параллельно работающих простейших элементов — нейронов, то при ее аппаратной реализации желательно обеспечить массовое параллельное выполнение простейших операций, при этом, чем большая степень параллельности вычислений достигается, тем лучше. Традиционным методом повышения степени параллельности вычислений является каскадирование процессоров, т.е. объединение нескольких процессоров в единой вычислительной системе для решения поставленной задачи. Поскольку процессоры работают независимо друг от друга, то вроде бы достигается необходимая степень параллельности. Однако не следует забывать об обмене данными между процессорами. Каналы обмена данными - это «узкое горло», которое может свести на нет все выигрыши в скорости вычислений. Действительно, если 32-разрядные процессоры работают на тактовой частоте, предположим, 200 МГц, а 32-разрядные каналы связи обеспечивают передачу данных с частотой, например, 20 МГц, то

такие межсоединения будут на порядок замедлять совместную скорость работы соединенных между собой процессоров. Разработчики параллельных систем борются за расширение и устранение «узкого горла», но скорость современных процессоров все равно растет быстрее, чем пропускная способность каналов передачи данных. Поэтому зачастую более выгодным решением оказывается использовать один более мощный процессор, чем несколько менее мощных, соединенных между собой.

Традиционно считается, что нейронные сети можно успешно реализовать на универсальных процессорах, RISC-процессорах или на специализированных нейронных процессорах (нейрочипах). У каждого из перечисленных типов аппаратной реализации есть свои достоинства и недостатки.

Универсальные микропроцессоры, ярким представителем которых является семейство Intel 386/486/Pentium/PII/PIII, являются наиболее доступными и успешно используются для моделирования нейронных сетей. Доступность и распространенность компьютерных систем, построенных на таких процессорах, являются весомыми достоинствами для их применения. В качестве их основных недостатков для моделирования нейронных сетей обычно отмечается неадекватность (избыточность) архитектуры (хотя этот «недостаток» находится под большим вопросом) и сложности, связанные с каскадированием, т.е. сложности при построении многопроцессорных систем для увеличения суммарной производительности, хотя в свете вышесказанного, этот недостаток также можно оспаривать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щука А.А. Электроника. Уч. Пособие. Под ред. проф. А.С. Сигова.- Спб.: БХВ-Петербург, 2005. 2. Домрачев В.Г., Мальцев П.П. и др. Базовые матричные кристаллы и матричные БИС. - М.: Энергоатомиздат, 1992. 3. Зотов В.Ю. Проектирование цифровых устройств на основе ПЛИС фирмы XILINX в САПР WebPACK ISE. - М.: Горячая линия-Телеком, 2005. - 624с. 4. Тарасов И.Е. Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС XILINX с применением языка VHDL. - М.: Горячая линия-Телеком, 2005. - 252с

УДК 539.4.015.2

Подлозный Э. Д., Гречихин Л. И.

НАНОТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА УПРОЧНЕННОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ КРЕМНЕЗЕМА И ГЛИНОЗЕМА, АРМИРОВАННЫХ КЛАСТЕРАМИ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ

*ЧУО «БИП- институт правоведения», Минск
Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Введение. В настоящее время особое внимание уделяется анализу строения различных композиционных материалов в машиностроении на наноуровне. Начиная с середины восьмидесятых годов прошлого века опубликовано большое количество работ (преимущественно экспериментальных) в этом направлении [1]. Теоретическое обоснование строения композитных материалов на наноуровне нашло отражение в [2-5]. Кластерные образования экспериментально обнаружены в расплавах при использовании метода молекулярной динамики [6], а в композитных материалах кластерные образования обнаружены и исследованы в [7]. Поведение кластерных образований под воздействием магнитных полей и температуры исследовано в [8] и обнаружено исчезновение кластеров при низких температурах, явление которое было предсказано теоретически в работе [9]. Таким образом, нанокластерное строение композитного конденсированного состояния прочно вошло в науку и технику.

В этой связи применительно к композиционному материалу на основе кремнезема (SiO_2) и глинозема (Al_2O_3), армированных кластерами карбоната кальция, возникает цель: *выяснить структуру и различные типы взаимодействий, которые формируют такой композиционный материал, на наноуровне*. В соответствии с поставленной целью возникает необходимость в решении следующих задач:

- выяснить, каким образом образуются многоатомные молекулы, кластерные образования и кластерные решеточные структуры двуокиси кремния, оксида алюминия и карбоната кальция;

- рассмотреть механизм межкластерного взаимодействия различных внедренных примесей в композитном материале на основе кремнезема и глинозема;

- определить основные требования к технологии изготовления композитов на основе кремнезема и глинозема, армированных кластерами карбоната кальция, с максимальными характеристиками прочности и жесткости.

Ниже рассмотрим последовательно каждую из сформулированных задач.

Образование многоатомных молекул. Образование молекул кремнезема происходит последовательно в два этапа: вначале образуется радикал SiO , а затем он взаимодействует с атомом кислорода. В двухатомной молекуле SiO электрические дипольные моменты направлены противоположно, и их разность $\Delta p_p = 5,83 \cdot 10^{-30} - 5,37 \cdot 10^{-30} = 0,46 \cdot 10^{-30}$ Кл·м является результирующим электрическим моментом молекулы SiO .

В следующем этапе атом кислорода вступает в реакцию с радикалом SiO ($\text{SiO} + \text{O} \leftrightarrow \text{SiO}_2$). При этом образуется молекула кремнезема. Электрический дипольный момент с углом между связями 138° $p_{p,\text{рез}} = 5,83 \cdot 10^{-30} + 3,85 \cdot 10^{-30} = 9,68 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Энергия ионизации 11,7 эВ. Средний ковалентный радиус 1,58 Å.

Образование молекулы Al_2O_3 обусловлено взаимодействием атома кислорода с двумя радикалами AlO . Результирующая энергия связи частиц в молекуле Al_2O_3 определяется диполь-дипольным взаимодействием и ковалентной связью между радикалами AlO и взаимодействием атома кислорода с двумя радикалами AlO ковалентной и ионной связями. Энергия диполь-дипольного взаимодействия между радикалами AlO будет наибольшей, если электрические диполи этих молекул расположатся последовательно. При таком расположении молекул AlO их энергия диполь-дипольного взаимодействия равна 0,878 эВ, а ковалентная связь составляет только 0,270 эВ. Атом кислорода с двумя молекулами AlO обладает ковалентной связью 0,279 эВ и ионной связью 5,70 эВ. Следовательно, результирующая энергия образования молекулы Al_2O_3 имеет значение примерно 7,12 эВ, а энергия разрыва связи атома кислорода с двумя молекулами AlO - 5,97 эВ. Для изолированной молекулы Al_2O_3 дипольный электрический момент составляет $3,87 \cdot 10^{-29}$ Кл·м. Энергия ионизации - 9,513 эВ [10]. Структура молекулы Al_2O_3 определена путем нахождения минимума потенциальной энергии взаимодействия атомарных структур в указанной молекуле.

Образование молекулы карбоната кальция CaCO_3 происходит также достаточно сложно. Вначале образуются двухатомные молекулы CaO и CO , а затем эти молекулы взаимодействуют друг с другом и с атомом кислорода. При этом атом кислорода может находиться только у радикала CO , у которого имеется свободная валентная связь, и образовывать молекулу CO_2 . Поэтому в молекуле карбоната кальция молекула CaO по существу взаимодействует с молекулой CO_2 .

Атомы кислорода и кальция в молекуле CaO на расстоянии $r_e = 1,822$ Å связаны между собой ковалентной и ионной связью, а также электрон-дипольным взаимодействием. Атом кальция встроенным дипольным электрическим моментом не обладает, а атом кислорода вследствие взаимодействия p- и s-электронов внутри атома обладает встроенным дипольным электрическим моментом, равным: $5,37 \cdot 10^{-30}$ Кл·м [9].

Величина результирующей энергии связи молекулы CaO $E_{\text{рез}} = 4,52$ эВ. Экспериментальное значение 4,3 эВ [11] получено с погрешностью не более 10%. Поэтому теоре-

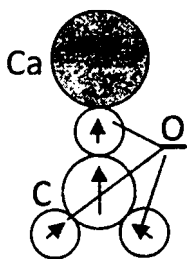


Рис. 1. Структурная схема молекулы CaCO_3

тическое значение в пределах допущенных ошибок измерений совпадает с данными эксперимента. Энергия ионизации молекулы CaO составляет 6,5 эВ. Дипольный электрический момент этой молекулы соответствует дипольному электрическому моменту атома кислорода, т.е. $5,37 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Межъядерное расстояние $r_e = 1,252 \text{ \AA}$ [11].

Молекула карбоната кальция CaCO_3 образуется путем взаимодействия молекул CaO и CO_2 . Максимум энергии взаимодействия имеет место при последовательном расположении дипольных электрических моментов, как это показано на рис.1.

На рис.1 также показано расположение дипольных электрических моментов для каждого атома. Такому расположению дипольных электрических моментов соответствует значение энергии 1,34 эВ. При такой энергии связи молекула карбоната кальция является достаточно прочной.

Образование кластерных структур. Сложные молекулы кремнезема, глинозема и карбоната кальция обладают большим значением дипольного электрического момента. Поэтому они образуют кластеры простой кубической структуры ионного типа. Усредненная энергия связи одних и тех же частиц в ионном кристалле определяется по формуле [12]:

$$E_{\text{св.,кл.}} = \frac{8p_d^2}{4\pi\epsilon_0 R^3} \left(-1 + \frac{0,5776}{2^{3,2}} - \frac{0,669}{3^{3,2}} + \dots \right), \quad (1)$$

где R – среднее расстояние между молекулами внутри кластера.

Результаты расчета средней энергии связи частиц внутри кластера, расстояния между частицами в кластере и средние дипольные электрические моменты молекул карбоната кальция, формирующих кластер, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные и результаты расчета энергий связи внутри кластеров

Параметры	Исходные молекулы		
	CaCO_3	Al_2O_3	SiO_2
$R, \text{ \AA}$	3,45...6,85	3,64	3,16
$P_d, \text{ Кл}\cdot\text{м}\cdot 10^{29}$	1,65	2,02	9,68
$E_{\text{св.,кл.}}, \text{ эВ}$	0,189	3,517	1,234
$E_{\text{св.,л.}}, \text{ эВ}$	0,095	0,950	0,334
$E_{\text{св.,пл.}}, \text{ эВ}$	0,370	0,475	0,168

Из таблицы 1 следует, что молекулы всех кластерных образований прочно связаны друг с другом. Распад кластеров при высоких температурах происходит вначале в горизонтальном направлении, а затем только в вертикальном. Известно, что при температуре 1098 К карбонат кальция разлагается [13]. На основании табл.1 в кластере карбоната кальция при расчетной температуре 1098 К происходит разрыв связи молекул карбоната кальция в вертикальном направлении, и при этом кластер начинает распадаться, что экспериментально отмечено, как разложение карбоната кальция.

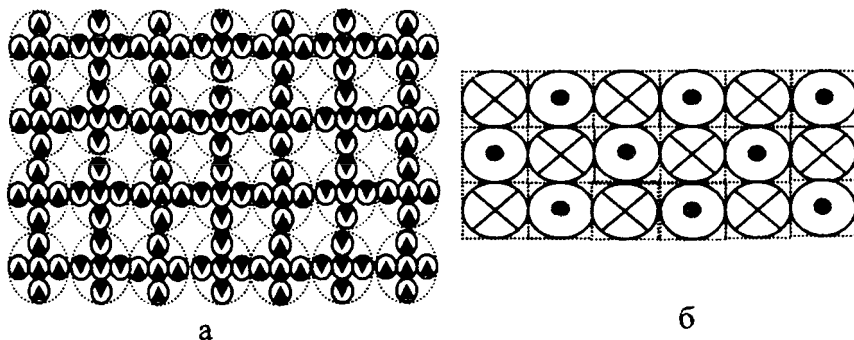


Рис. 2. Фрагмент кластерной решеточной структуры ионного кристалла:
а, б – вид в вертикальной плоскости и в горизонтальной плоскостях соответственно

Взаимодействие между кластерами создает межкластерную решеточную структуру, которая определяет конденсированное состояние. На рис. 2 приведена кластерная решеточная структура ионного кристалла. Такой кристалл пронизан в вертикальном и горизонтальном направлениях столбообразными пустотами, размер которых составляет $d = 2r_{кл.}(\sqrt{2} - 1)$. Поверхность такого кристалла представляет собой периодическую электрически знакопеременную структуру. Упрочнить ее можно путем введения в столбообразные пустоты молекул или кластеров соответствующих размеров, обладающих сравнительно большим значением дипольного электрического момента. Рельеф поверхности определяется размером кластера.

Кластеры карбоната кальция связаны в горизонтальном направлении в основном диполь-дипольным взаимодействием, величина которого составляет 0,270 эВ, а в вертикальном направлении они связаны энергией 0,252 эВ.

Результаты вычисления энергосвязи кластеров карбоната кальция с кластерами глинозема кремнезема сведены в табл. 2.

Таблица 2-Межкластерное расстояние, размер межкластерных пустот и энергия связи кластеров карбоната кальция с кластерной решеточной структурой кремнезема и глинозема

Тип кластера	Параметры			
	R, Å	d, Å	E _{св.} , эВ	E · 10 ¹¹ , Па
SiO ₂	5,005	2,073	0,143	1,01
Al ₂ O ₃	5,245	2,172	0,259	1,61

Композиционный материал на основе кремнезема, армированного кластерами карбоната кальция используется при замешивании бетона. В этом случае температурное разрушение бетона будет происходить на границе связи кластеров карбоната кальция с частицами песка. Температура расслоения кластеров карбоната кальция с частицами кремнезема в соответствии с их энергией связи (0,143 эВ) составляет примерно 1660 К.

Чтобы бетон обладал такими свойствами необходимо заполнить столбообразные пустоты кремнезема молекулами карбоната кальция, которые внутри межкластерных пустот будут объединяться и формировать кластеры. Отдельные молекулы карбоната кальция можно получить путем распада кластера. Для этого можно использовать подогрев до температуры 1660 К, однако он значительно усложняет технологию получения конструкционного бетона. Выход был найден в использовании водного раствора. Вода обладает большой диэлектрической проницаемостью и поэтому в воде кластеры карбоната кальция будут эффективно распадаться на отдельные атомы уже при температуре около 14 К, а в нормальных условиях кластеры карбоната кальция в водном растворе вообще не образуются.

При заполнении столбообразных пустот молекулами карбоната кальция важно чтобы энергия связи кластеров молекул воды с той или иной основой была меньше чем связь молекул карбоната кальция с данной основой. В этом случае молекулы карбоната кальция будут вытеснять с поверхности основы кластеры воды.

Кластеры воды обладают радиусом примерно 3,42 Å и дипольным электрическим моментом $5,37 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Связь кластера воды с молекулой карбоната кальция 0,073 эВ, а минимальная энергия связи между молекулами карбоната кальция 0,095 эВ. По мере выпаривания воды образуются кластеры карбоната кальция, и они будут выталкивать воду на поверхность конструкционного бетона. Так протекает процесс схватывания бетона. Взаимодействие кластеров воды с кластерами всех остальных веществ составляет не более нескольких тысячных долей электрон-вольт. Поэтому вода не является препятствием для проникновения молекул карбоната кальция в основу кремнезема. По мере осаждения молекул карбоната кальция на той или иной основе образуются кластеры, которые должны располагаться с максимальной энергией связи.

При известной энергии межкластерных связей, которая в основном определяется диполь-дипольным взаимодействием, представляется возможность определить модули Юнга для

различных межкластерных взаимодействий. Модуль Юнга связан с энергией связи следующим образом:

$$E = \frac{U(r) - U(r_0)}{r_0 S_{кл} e^2}, \quad (2)$$

где $U(r)$, $U(r_0)$ – потенциалы взаимодействия на расстоянии r между взаимодействующими частицами и на равновесном удалении r_0 ; $S_{кл}$ – площадь кластера; e – относительная деформация. При использовании данных табл. 2 по энергиям взаимодействия были выполнены расчеты модулей Юнга. Результаты этих вычислений приведены в табл. 2. Для бетона модуль Юнга зависит от направления приложенной нагрузки. Обычно бетон невозможно выполнить в виде монокристалла. Поэтому для поликристаллического бетона модуль Юнга соответствует нижнему значению, приведенному в табл. 2, т.е. $5,5 \cdot 10^{10}$ Па, а сравнить его с экспериментальными данными можно чисто качественно. Так, в [13] приводятся значения для высокопрочного бетона $4,03 \cdot 10^{10}$ Па, а с фиброй $4,16 \cdot 10^{10}$ Па. С данными эксперимента теоретический расчет отличается незначительно.

Взаимодействие кластеров карбоната кальция с кластерами глинозема обуславливает более высокое значение модуля Юнга.

Нанотехнология изготовления бетона. Основные требования, предъявляемые к нанотехнологии изготовления композитных материалов на основе кремнезема и глинозема следующие:

1. Формирование конденсированного состояния кремнезема, армированного кластерами карбоната кальция, следует производить путем замешивания частиц песка минимального размера 100 нм с равномерным распределением по всему объему карбоната кальция и частиц песка. Такая смесь заливается водой и доводится температура до 100°C . При этой температуре кластеры карбоната кальция и воды распадаются на молекулы и это способствует более эффективному процессу проникновения молекул карбоната кальция в межкластерные пустоты кремнезема. Энергия межкластерной связи карбоната кальция выше энергии межкластерной связи воды. Поэтому вода будет выталкиваться как из межкластерных пустот кремнезема, так и со всего объема образующегося композиционного материала на его поверхность. Так происходит «схватывание» бетона с образованием кристаллического монолита нанокластеров карбоната кальция внутри основы кремнезема.

2. Из табл. 2 видно, что несколько большая энергия связи реализуется при росте кластеров карбоната кальция в межкластерных пустотах глинозема. Такой композиционный материал использовать в строительстве было бы целесообразнее, так как его механические свойства более привлекательны. Однако технология производства такого композита не простая задача.

Заполнение нанокластерами карбоната кальция межкластерных пустот глинозема сложная дорогостоящая технология. Производство такого композита возможно осуществить, применив две технологии. Если необходимо получать более равномерную структуру, то композиционный кристалл следует получать путем роста кристалла из расплава при температуре плавления глинозема (2323 К).

Если не требуется получать строго равномерную структуру, то можно использовать такую же технологию, как при производстве бетона, но вместо воды применить жидкое состояние вещества, у которого встроенный электрический момент значительно превосходит дипольный электрический момент воды. Например, это может быть изопропанол. Такая технология была разработана применительно к производству электропроводящей керамики нитрида кремния [9]

ЛИТЕРАТУРА

1. Анелло М.А. и др. // Механика композитных материалов. 2003. Т. 39, № 4. С. 431–444.
2. Тенферс Р., де Лоренцис Л. // Механика композитных материалов. 2003. № 4. С. 477 – 496.
3. Плескачевский Ю.М. и др. // Механика машин, механизмов и материалов. 2009. № 1. С. 67 – 71.
4. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. – М., 2007.
5. Суздаев И.П., Суздаев П.И. // Успехи химии. 2001. Т. 70, Вып. 3. С. 203 – 240.
6. Еланский Г.Н. Строение и свойства металлических расплавов. – М.: Металлургия, 1991. – 160 с.
7. Илюшенко А.Ф. и др. // Сварка и родственные технологии. 2008. № 10. С. 97-102.
8. Макогонюк Г.Д., Айдаров В.М., Седов А.Д. Наноструктура поверхности кристаллов, полученных из растворов, подвергшихся различ-

ным физическим воздействиям // Молодежный инновационный форум Приволжского федерального округа. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. С.183. 9. Гречихин Л.И. Наночастицы и нанотехнологии. Мн., 2008. 10. Витязь П.А., Подлозный Э.Д., Гречихин Л.И. Нанотехнология производства упрочненного бетона с различной матрицей композита // Вести Национальной академии наук Беларуси, 2010, № 1, С. 5-13. 11. Радциг А.А., Смирнов Б.М. Справочник по атомной и молекулярной физике. М., 1980. 12. Гречихин Л.И., Иващенко С.А. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз. – тэх. навук, 2002. № 4. С. 11 - 17. 13. Скребцов А.М. // Известия вузов. Черная металлургия. 2009. № 2. С. 28 - 31.

УДК 004.912

Романюк Г.Э., Мардас Д.В., Журавский А.О.

ПРОГРАММА ПОДСЧЕТА ЧАСТОТЫ ВХОЖДЕНИЯ СЛОВ В ТЕКСТЕ НА БЕЛОРУССКОМ И ПОЛЬСКОМ ЯЗЫКАХ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Сегодня параллельно с бурным развитием технологий, общества, маркетинговых программ увеличивается объем информационных потоков. Успешное ведение бизнеса невозможно без непрерывного контроля за рыночной средой. С помощью получения, обработки информации и ее управления менеджеры компаний могут узнать об изменении потребностей покупателей, новых шагах конкурентов, состоянии каналов сбыта.

Несмотря на широкое использование мультимедиа, текст остается одним из основных видов информации в большинстве электронных хранилищ. Разработка эффективных подходов к обработке текстов с целью фильтрации, формирования смыслового портрета, навигации по базе текстов является одним из наиболее актуальных направлений современных информационных технологий.

В связи с развитием информационных ресурсов сети Интернет документальное информационное пространство развилось до такого уровня, который требует новых подходов. Рост объемов информации и скорости ее распределения фактически породил понятие информационных потоков. Вместе с тем, математический аппарат и инструментальные средства уже не всегда способны адекватно отражать ситуацию, речь идет не столько об анализе конечных массивов документов, сколько о навигации в документальных информационных потоках [1].

Большое значение приобретает такое понятие как "преобразование информации в знания". Этому в значительной мере способствуют чисто прикладные успехи в машинной обработке потоков данных, содержащих документы, не только составленные на разных языках, но и относящихся к различным социокультурным контекстам. Понятно, что в таком случае обработка потока данных (т. е. информации в чистом виде), какой бы она ни была, не предполагает активного использования содержания документов. Практика показывает, что информация может вполне успешно обрабатываться вне зависимости от того, какой смысл в нее заложен. В связи с этим возникает интерес к подходам, основанным на статистической обработке текста.

Наиболее широко используемым способом поиска нужной информации в Интернете является метод с использованием поисковых систем, но в то же время он является и наиболее сложным. Его широкая распространенность обусловлена тем, что поисковые системы содержат в себе индексы громадного количества сайтов и при правильно сформированном запросе можно сразу же получить ссылки на интересующие ресурсы. Сложность метода состоит в том, что для того, чтобы результат был качественным, необходимо уметь выбрать наиболее подходящие поисковые системы, правильно формулировать запросы к ним, учитывать их особенности и функциональные возможности.

Двоякая характеристика данного метода связана с тем, что проведение эффективного поиска требует одновременного решения двух противоположных задач: увеличении охвата с целью извлечения максимального количества значимой информации и уменьшении охвата с целью миними-

зации шумовой информации. Нетрудно увидеть, что одновременно осуществить и то и другое довольно сложно, хотя найти оптимальное соотношение все-таки возможно [2].

Для эффективного использования поисковых серверов, прежде всего необходим список ключевых слов, организованный с учетом семантических отношений между ними, то есть тезаурус.

Одним из подходов к составлению тезауруса может стать использование законов Ципфа. Рассмотрим их более подробно.

Число, показывающее сколько раз встречается слово в тексте, называется частотой вхождения слова. Если расположить частоты по мере убывания и пронумеровать, то порядковый номер частоты называется рангом частоты. Вероятность обнаружения слова в тексте равно отношению частоты вхождения слова к числу слов в тексте:

$$C = \frac{f \cdot r}{n},$$

где f — частота вхождения слов, r — ранг частоты, n — число слов.

Это значит, что график зависимости ранга от частоты представляет из себя равноостороннюю гиперболу (рис. 1).

Ципф также установил, что зависимость количества слов с данной частотой от частоты постоянна для всех текстов в пределах одного языка и также является гиперболой [3].

Исследование вышеуказанных зависимостей для различных текстов показали, что наиболее значимые слова текста лежат в средней части диаграммы, так как слова с максимальной частотой, как правило, являются предлогами, частицами, местоимениями, в английском языке — артиклями (так называемые «стоп-слова»), а редко встречающиеся слова в большинстве случаев не имеют решающего значения. Таким образом, данная особенность может помочь правильно выбрать ключевые слова для проведения поиска информации.

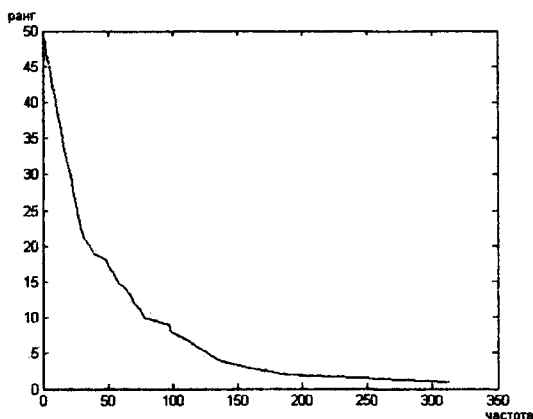


Рис. 1. График зависимости ранга от частоты вхождения слова

Процедура оптимального выбора ключевых слов, основанная на применении законов Ципфа, заключается в следующем: берут любой текст-источник, близкий к искомой теме, то есть «образец», и анализируют его, выделяя значимые слова. В качестве текста-источника может служить книга, статья, web-страница, любой другой документ. Анализ текста производится в следующем порядке:

- «стоп-слова» удаляются из текста;
- вычисляется частота вхождения каждого слова и составляется список, в котором слова расположены в порядке убывания их частоты;
- выбирается диапазон частот, лежащий в середине списка, и из него отбираются слова, наиболее полно соответствующие смыслу текста;
- составляется запрос к поисковой машине в форме перечисления отобранных таким образом ключевых слов, связанных логическим оператором OR(ИЛИ) Запрос в таком виде позволяет обнаружить тексты, в которых встречается хотя бы одно из перечисленных слов.

Число документов, полученных в результате поиска по этому запросу, может быть огромно. Однако, благодаря ранжированию документов, то есть расположению их в порядке убывания частоты вхождения в документ слов запроса, применяемому в большинстве поисковых машин, на первых страницах найденных ресурсов практически все документы должны оказаться релевантными.

Ципф определил, что если умножить вероятность обнаружения слова в тексте на ранг частоты, то получившаяся величина приблизительно постоянна для всех текстов на одном языке. Так, например, для английских текстов константа Зипфа равна приблизительно 0,1. Для русского и украинского языков коэффициенты Ципфа составляют приблизительно 0,06 - 0,07.

Для белорусского и польского языков константа Ципфа рассчитана не была, и поэтому ее расчет представляет несомненный интерес.

Но если для русского и других языков создан ряд программ для подсчета количества слов в тексте (например, Wordstat), то для белорусского и польского языков таких программ не существовало (по крайней мере, в печати о них сообщений не поступало).

Поэтому актуальной представлялась задача разработки программы для подсчета количества слов в тексте на белорусском и польском языках. Такая программа была разработана на кафедре «Интеллектуальные системы» БНТУ студентами группы 103616 Мардасом Дмитрием Васильевичем и Журавским Алексеем Олеговичем под руководством Романюк Галины Эдуардовны.

Для упрощения проведения анализа законов Ципфа для текста на белорусском и польском языках была написана программа POL-BEL с помощью объектно-ориентированного языка программирования С#. Данная программа выполняет следующие операции:

- открывает текст на польском либо на белорусском языке;
- автоматически распознает открытый текст;
- проводит анализ открытого текста. То есть подсчитывает частоту вхождения слова в текст, подсчитывает общее количество слов в тексте, производит поиск и отображение слова, введенного с клавиатуры пользователем;
- сохраняет результат проведения анализа в текстовый документ с расширением «.TXT».

Интерфейс программы представлен на рис. 2.

Рассмотрим подробнее элементы управления и поля ввода и вывода информации написанной программы.

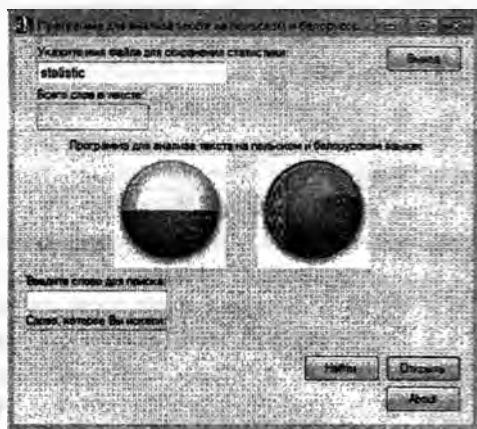


Рис. 2. Пользовательский интерфейс программы POL-BEL

Поле ввода под именем «Укажите имя файла для сохранения статистики» (рис. 2), предназначено для того, чтобы пользователь ввел имя файла, в котором будет сохранен результат анализа текста, либо если пользователь не внесет свое имя файла, то программа автоматически сохранит данный файл под именем «statistic» с расширением «.TXT».

Следующим управляющим элементом программы является кнопка под именем «Открыть» (рис. 2). Данная кнопка необходима для того, чтобы пользователь указал путь к файлу с расширением «.TXT», «.DOC», который хранит текст на польском или белорусском языке.

После того как пользователь открыл указанный им файл, программа автоматически производит анализ текста. А именно:

- автоматически распознает на каком языке написан текст (польский или белорусский язык);
- подсчитывает общее количество слов в тексте;
- подсчитывает частоту вхождения каждого слова в тексте;
- при необходимости осуществляет поиск интересующего пользователя слова и вывод его в поле под именем «Слово, которое Вы искали»;
- сохраняет результат проведения анализа текста.

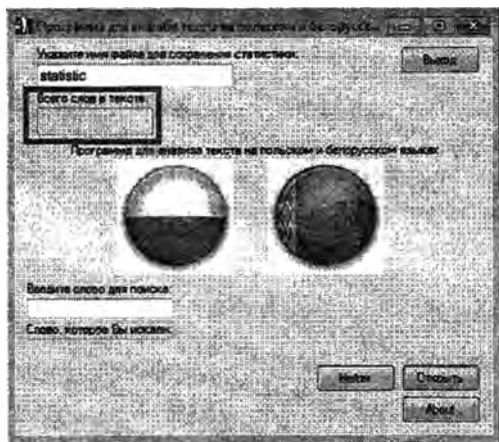


Рис. 3. Пользовательский интерфейс



Рис. 4. Окно About

На рис.3 прямоугольником выделено поле под именем «Всего слов в тексте», которое отображает сколько всего слов содержит данный текст.

В нижней части окна программы имеется два поля (рис. 3):

- поле ввода «Введите слово для поиска», в которое пользователь при необходимости может ввести интересующее его слово, которое содержится в данном тексте.
- поле вывода «Слово, которое Вы искали», в котором отображается слово, введенное пользователем в поле под именем «Введите слово для поиска» и его частота. Если пользователь ввел слово, которого нет в тексте, то данное поле останется пустым.

Для того, чтобы программа произвела поиск слова, введенного пользователем с клавиатуры, необходимо нажать кнопку «Найти» (рис. 3).

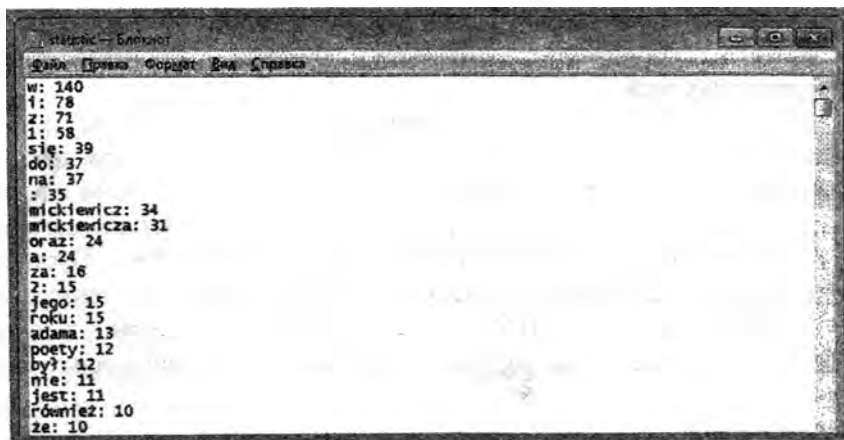


Рис. 5. Результат выполнения программы

На рис. 3 в верхнем правом углу находится кнопка под названием «Выход», при нажатии на которую происходит выход из программы POL-BEL, предварительно сохранив файл с выполненным анализом текста с расширением «.TXT».

На рис. 3 в нижнем правом углу прямоугольником выделена кнопка под названием «About», при нажатии на которую появляется окно About (рис. 4). В данном окне представлена краткая информация о разработчике программы POL-BEL, для чего данная программа предназначена и электронный почтовый адрес разработчика, на который можно присылать благодарности и замечания после использования программы POL-BEL.

Результат проведения анализа текста на польском языке «Adam Mickiewicz» представлен на рис. 5. Текст «Adam Mickiewicz» включает в себя 3096 слов или 20285 символов без учета знаков препинания, или 23287 символов с учетом знаков препинания и пробелов. В файле в колонку записано слово и частота вхождения данного слова в текст.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландэ Д.В., Литвин А.Б. Феномены современных информационных потоков // "Сети и бизнес". - 2001. - N 1. - С. 14-21
2. Успенский И.В. Интернет-маркетинг. Учебник.-СПб.: Издательство СПбГУЭиФ.-2003.- 92с.
3. [Электронный ресурс] / Официальный сайт Wikipedia; Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_Ципфа, - свободный. – Загл. С экрана. – Яз. Рус.-2010

УДК 537.311.322

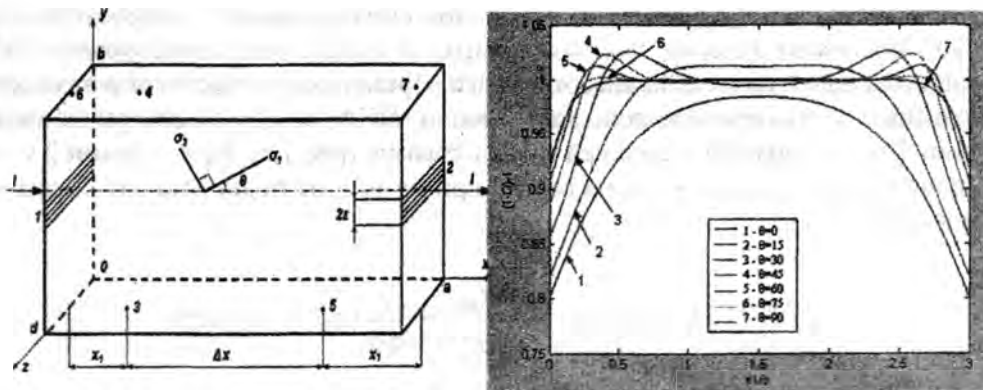
Соколова К.Г., Сунка В.Я., Трафимова Е.В.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕНЗОРА ПРОВОДИМОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Полупроводниковая кремниевая микроэлектроника достигла впечатляющих результатов и приступила к выпуску кристаллов с миллиардным количеством элементов в нем. Дальнейшее увеличение степени интеграции и плотности упаковки элементов на кристалле требует использования новых материалов, в т. ч. и использование гетероструктурной полупроводниковой материалов, основанных и на анизотропных полупроводниках. Методика и оборудование для измерения электросопротивления изотропных полупроводниковых образцов различных геометрических форм и размеров, в т. ч. и микро - нано материалов хорошо разработаны [1], однако измерение составляющих тензора электросопротивления анизотропных полупроводниковых материалов остается не до конца решенной проблемой. Проанализируем известные методы измерения компонент тензора удельного сопротивления анизотропных полупроводниковых материалов с произвольной ориентацией кристаллографических осей и координатных осей.

Метод для объемных анизотропных полупроводниковых кристаллов [2] позволяет определять указанные компоненты путем двух измерений напряжения при постоянном токе через образец, требует изготовления одного образца и минимального числа точечных контактов к нему. Теоретическое обоснование метода выполнено на основе расчета электрического поля в анизотропном образце и компьютерного моделирования распределения потенциала и плотности тока. Пусть плоский образец диарсенида кадмия прямоугольной формы вырезан так, что главные оси тензора электропроводимости равные $\sigma_1 = 2600 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ и $\sigma_2 = 900 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, взаимно перпендикулярны, и составляют с границами образца угол θ , а толщина $d = 1 \text{ мм}$ образца значительно меньше его длины $a = 12 \text{ мм}$ и ширины $b = 4 \text{ мм}$ (рис. 1,а).



а) б)
 Рис. 1. а) схема расположения контактов к образцу,
 б) зависимость ошибки $(1-Q)^{-1}$ от величины x/b
 в пределах $x_{lmax} = a$ при различных углах
 $\theta = 0^\circ (1), 15^\circ (2), 30^\circ (3), 45^\circ (4), 60^\circ (5), 75^\circ (6), 90^\circ (7)$

На рис. 1,а плоскости ХОУ соответствовала кристаллографическая плоскость (100), σ_1, σ_2 являлись электропроводностями по направлениям кристалла [001] и [010] соответственно.

Токовые контакты шириной 2ε расположены на оси симметрии образца и тензор электропроводности материала образца можно записать в виде [2]

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta \\ \sigma_{yy} &= \sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_2 \cos^2 \theta \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{yx} = 0,5(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При пропускании через контакты 1,2 постоянного тока I электрический потенциал $\varphi(x, y)$ в области образца удовлетворяет краевой задаче [2]

$$\sigma_{xx} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + 2\sigma_{xy} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} + \sigma_{yy} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

$$\left(\sigma_{xx} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \sigma_{xy} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_{x=0,a} \begin{cases} -\frac{I}{2\varepsilon d} \text{ при } (b/2 + \varepsilon) \geq y \geq (b/2 - \varepsilon) \\ 0 \text{ в остальной области} \end{cases} \quad (4)$$

и

$$\left(\sigma_{xy} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \sigma_{yy} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_{y=0,b} = 0. \quad (5)$$

Анализ рассчитанных с использованием работ [3÷5] на микропроцессоре с помощью пакета MathCAD 13 или MATLAB [6] значений плотности тока j_i , электрического потенциала $\varphi(x, y)$ в области образца, удовлетворяющих краевой задаче (3-5), показывает, что распределение величин плотности тока j_i и потенциала $\varphi(x, y)$ в анизотропных образцах значительно отличается от изотропных. Линии тока в анизотропных образцах выглаткиваются из объема в

направлении более легкой проводимости, при этом они составляют с эквипотенциалами угол не равный 90° . Возникает явление, так называемых, вихревых токов анизотропии (ВТА) [2]. Наклон эквипотенциалей на модели анизотропного образца свидетельствует о возникновении разности потенциалов (поперечное поле анизотропии -ПНА) между симметрично расположенными точками 3 и 4 на нижней и верхней гранях образца (рис.1,а). При условии $2\varepsilon \ll b$ разность потенциалов между точками 3 и 4 на гранях при $y=0$, b не будет зависеть от значения x и запишется выражением

$$U_0 = \varphi_4 - \varphi_3 = \frac{I\sigma_{xy}}{d\sigma_0^2} = \frac{I}{2d}(\rho_2 - \rho_1)\sin 2\theta, \quad (6)$$

где ρ_1, ρ_2 — главные компоненты тензора удельного сопротивления материала образца.

Из равенства (6) видно, что наличие этого напряжения обусловлено отличной от нуля компонентой σ_{xy} тензора проводимости. Для точечных контактов величина ПНА не зависит от геометрических размеров кристалла и определяется углом наклона θ главных осей тензора проводимости к границам образца, т. е. ВТА выравнивают распределение заряда на гранях $y=0, b$ по длине образца.

По полученной формуле (6) можно вычислить разность главных $(\rho_2 - \rho_1)$ компонент тензора удельного сопротивления по измеренным значениям величины ПНА и угла θ :

$$\rho_2 - \rho_1 = \frac{2U_0 d}{I \sin 2\theta}. \quad (7)$$

Для отдельного вычисления ρ_1 и ρ_2 проводят второе независимое измерение разности потенциалов между другой парой точек на поверхности образца, выбранных также на одной из граней $y=0, b$. Разность потенциалов между произвольными точками 3,5 (рис.1,а) на грани $y=0$:

$$U_{3,5} = \varphi_3 - \varphi_5 = \frac{I\Delta x}{db}(\rho_2 \sin^2 \theta + \rho_1 \cos^2 \theta)(1 - Q)^{-1}; \quad (8)$$

$$Q = \frac{4}{\Delta x} \sum_{n=2,4,\dots} (-1)^{n/2} \frac{\sin \alpha_n \varepsilon}{\alpha_n \varepsilon} \cdot (ch[\alpha_n \gamma_1 (a - x_1)] \cos(\alpha_n \gamma^2 x_1) - ch[\alpha_n \gamma_1 x_1] \times \\ \times \cos[\alpha_n \gamma^2 (a - x_1)]) \left[\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_0} \alpha_n sh(\alpha_n \gamma_1 a) \right]^{-1}. \quad (9)$$

где $\Delta x = x_5 - x_3 = a - 2x_1$ — расстояние между данными точками; Q — поправочный множитель, который учитывает сопротивление растекания тока в приконтактных областях образца размером x_1 ,

где имеются вихревые токи [2],

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}}}; \quad \gamma_1 = \frac{\sigma_0}{\sigma_{xx}}; \quad \sigma_0 = (\sigma_1 \sigma_2)^{1/2}; \quad \alpha_n = \frac{\pi n}{b}.$$

Размер x_1 — это приконтактные области, за пределами которых величина множителя $(1-Q)^{-1}$ близка к единице, а продольное падение напряжения $U_{3,5}$ зависит от Δx линейно.

На рис. 1,б представлены графики зависимости $(1-Q)^{-1}$ от x_1/b . Графики рассчитаны в системе Matlab по выражению (9).

Измерив продольное падение напряжения $U_{3,5}$ в средней части образца за пределами приконтактных областей, можно определить компоненту тензора удельного сопротивления:

$$\rho_2 \sin^2 \theta + \rho_1 \cos^2 \theta = \frac{U_{3,5} db}{I \Delta x} \quad (10)$$

Формулы (6) и (8) позволяют вычислять главные компоненты тензора удельного сопротивления материала образца по измерениям поперечного и продольного падений напряжения.

Проанализируем полученные зависимости величины поправочного коэффициента $(1-Q)^{-1}$ от геометрических размеров образца и места установки измерительных зондов относительно краев образца. Оценим величину погрешности определения проводимостей σ_1 и σ_2 через значение поправочного выражения $(1-Q)^{-1}$ (рис. 1,б). Максимальное значение погрешности имеет место при установке крайней пары зондов 3-4 на левый торец образца (при $x_1/b = 0$) и сильно зависит от величины угла θ . Максимальное значение погрешности при $x_1/b=0$ равно $k \approx 20\%$ при угле $\theta = 0^\circ$. С ростом угла θ погрешность уменьшается и при $x_1/b=0$ соответственно равна: $k \approx 14\%$ при угле $\theta = 30^\circ$ и $k \approx 7\%$ - угле $\theta = 90^\circ$. С увеличением отношения x_1/b погрешности уменьшаются и для $x_1/b \approx 1$ погрешности для всех углов θ уменьшаются в 3-4 раза относительно погрешностей при угле $\theta = 0^\circ$. С дальнейшим увеличением значения координаты $x_1/b \geq 2$ погрешность снова возрастает ввиду приближения правой пары зондов к краю образца. Зависимости $(1-Q)^{-1} = F(x_1/b)$ относительно срединных значений $x_1/b \approx 1,5$ строго симметричны.

Таким образом, для уменьшения погрешности определения составляющих проводимости σ_1 и σ_2 контролируемого анизотропного образца полупроводникового материала необходимо чтобы:

- измерительные образцы были правильной геометрической формы типа параллелепипеда и имели следующее соотношение геометрических размеров: $a/b \geq 3 \div 5$ и $d \approx (4 \div 5) / b$;

- пары крайних левых или правых измерительных зондов должны устанавливаться посередине длинной стороны образца, а расстояние от краев образца до зондов не должно быть меньше чем $x_1/b \leq 0,3$;

- главные оси тензора электропроводности взаимно перпендикулярны и угол θ между ними и направлениями координатных осей по возможности должен быть $\theta \geq (25 \div 40)^\circ$. При соблюдении этих условий погрешность измерения составляющих тензора электропроводности σ_1 и σ_2 анизотропного полупроводникового образца не превысит значений $(1 \div 2)\%$, что подтверждается и работой [2].

Второй метод [7] определяет компоненты электропроводности тонких (микронных и наноразмерных толщин) полупроводниковых пленок на основе известного четырехзондового метода при условии, что тензор удельной электропроводности приведен к диагональному виду. Метод теоретически обоснован путем решения соответствующих краевых задач электродинамики и компьютерного моделирования распределения электрического поля в образце. Он прост в измерении и расчетах и использует традиционную методику и оборудование 4-х зондового измерения электросопротивления. Теоретически доказано, что в анизотропных полупроводниках в отличие от изотропных существуют вихревые токи ВТА, действие которых существенно меняет распределение электрического поля в образце [2,7]. Построенная модель ВТА обрабатываются с помощью микропроцессорной техники и затем анализируется.

Рассмотрим прямоугольной формы, который вырезан так, что его грани параллельны кристаллографическим плоскостям образца (рис. 2).

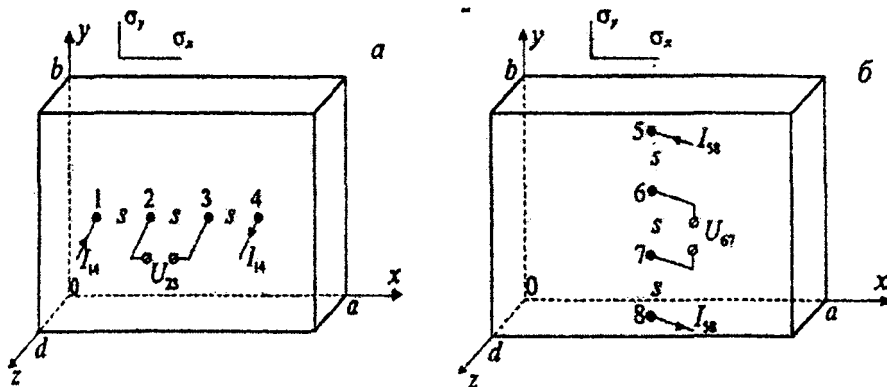
Для определения двух компонент электропроводности σ_x, σ_y необходимо провести два независимых измерения токов и напряжений при различных положениях зондового измерителя с линейным положением зондов. Вначале зондовый измеритель поместим на поверхности образца на оси его симметрии при $y = b/2$ вдоль линии, параллельной оси x , и проведем из-

мерения тока I_{14} и разности потенциалов U_{23} (рис. 2, а). Расчетная формула для вычисления компоненты проводимости в этом случае имеет вид:

$$\sigma_y = \frac{I_{58}}{U_{67}} \frac{b}{da} L_2(\gamma, a/s, b/s), \quad (11)$$

Затем располагаем зондовый измеритель на той же грани симметрично вдоль линии, параллельной оси y при $x = a/2$ (рис. 2, б), и измеряем ток I_{58} и разность потенциалов U_{67} . Расчетная формула для вычисления компоненты проводимости σ_y в этом случае имеет вид:

$$\sigma_y = \frac{I_{58}}{U_{67}} \frac{b}{da} L_2(\gamma, a/s, b/s), \quad (12)$$



а – горизонтальное и б – вертикальное расположение зондов
Рис. 2. Схема расположения измерительных зондов на прямоугольном образце

В выражениях (11) и (12) приняты обозначения a, b, d – длина, ширина и толщина образца; s – расстояние между зондами; $\gamma = \sqrt{\sigma_x / \sigma_y}$ – параметр анизотропии электропроводимости; I_{14} – сила тока между зондами 1, 4 и U_{23} – разность потенциалов между зондами 2, 3 при горизонтальном их расположении; I_{58} – сила тока между зондами 5, 8 и U_{67} – разность потенциалов между зондами 6, 7 при вертикальном их расположении; $L_1(\gamma, a/s, b/s)$ и $L_2(\gamma, a/s, b/s)$ – поправочные множители, которые являются функцией размеров образца, расстояния между зондами и параметра анизотропии γ .

Формулы (11), (12) используются только для тонких образцов, т. е. когда толщина образца много меньше его линейных размеров $d \ll a, b$. При значении отношения $d/s \leq 0,05$ образец при четырехзондовых измерениях считаем тонким [1, 7]. Для вычисления поправочных множителей L_1 и L_2 необходимо знать параметр анизотропии проводимости γ . Его можно определить, если воспользоваться отношением U_{23} / U_{67} при равных токах $I_{14} = I_{58}$. Из соотношений (11) и (12) получим

$$\frac{U_{23}}{U_{67}} = \left(\frac{\gamma a}{b}\right)^2 \frac{L_1}{L_2} = H(\gamma, a/s, b/s). \quad (13)$$

Величина H можно вычислить теоретически в зависимости от γ . Таким образом, задачей теории зондовых измерений проводимости в данном случае являются расчеты поправочных множителей L_1, L_2 и зависимости $H(\gamma)$, которые могут быть проведены методами электродинамики. Величина H можно определить экспериментально по отношению потенциалов U_{23} / U_{67}

При четырехзондовых измерениях на постоянном токе и в установившемся режиме векторы плотности тока j , напряженности электрического поля E и потенциал φ связаны соотношениями

$$j = \hat{\sigma} E, E = \text{grad}\varphi, \text{div}j = 0, \quad (14)$$

где $\hat{\sigma}$ — симметричный тензор электропроводимости кристалла. В нашем случае система координат выбрана так, что тензор $\hat{\sigma}$ имеет диагональный вид:

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

Отсюда получаем дифференциальное уравнение для потенциала:

$$\sigma_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \sigma_z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (16)$$

Путем решения краевой задачи для потенциала при расположении зондов по схеме рисунок 2, а получаем выражение для множителя L_1 , входящего в формулу (11) [7]:

$$L_1 = \frac{s}{a} + 2 \sum_{n=2,4,6\dots} (\{ch\gamma\alpha_n(a-s)\} - ch(\gamma\alpha_n s) + ch(2\gamma\alpha_n s) - ch[\gamma\alpha_n(a-2s)]) / (\gamma\alpha_n a) sh(\gamma\alpha_n a) \quad (17)$$

Аналогично путем решения краевой задачи для потенциала при расположении зондов по схеме рисунок 2, б получаем выражение для множителя L_2 , входящего в формулу (12) [7]:

$$L_2 = \frac{s}{b} + 2 \sum_{k=2,4,6\dots} (\{ch\alpha_k(b-s)/\gamma\} - ch(\alpha_k s/\gamma) + ch(2\alpha_k s/\gamma) - ch[\alpha_k(b-2s)/\gamma]) / (\alpha_k b/\gamma) sh(\alpha_k b/\gamma) \quad (18)$$

Предыдущими расчетами определяется величина H , входящая в равенство (13), для вычисления параметра анизотропии γ :

$$H(\gamma, a/s, b/s) = \left(\frac{\gamma a}{b}\right)^2 \frac{L_1}{L_2} \quad (19)$$

Представляет интерес вычисление величин поправочных множителей L_1 и L_2 для неограниченного образца ($a/s \rightarrow \infty, b/s \rightarrow \infty$). Выполнен расчет величин σ_x, σ_y по формулам (11), (12), (17), (18) на микропроцессоре при условиях $(a, b) \gg s$, т. е. для неограниченных пленок [8]. В результате расчетов получено, что в случае бесконечной пленки выражения (11) и (12) существенно упрощаются и принимают соответственно в виде:

$$\sigma_x = 0,2206 \frac{I_{14}}{\gamma d U_{23}}, \quad \sigma_y = 0,2206 \frac{\gamma I_{58}}{d U_{67}} \quad (20)$$

В данном случае для тонких образцов расчетные формулы для вычисления компонент электросопротивления при расположении зондов параллельно оси x и оси y имеют вид:

$$\rho_x = \frac{1}{\sigma_x} = 4,532 \frac{U_{23}}{I_{14}} d \gamma, \quad \rho_y = \frac{1}{\sigma_y} = 4,532 \frac{U_{67}}{\gamma I_{58}} d \quad (21)$$

Наличие приведенных выше аналитических выражений для потенциала, плотности тока, поправочных коэффициентов L_1 и L_2 и вихревых токов позволяет моделировать электриче-

ское поле в образцах с помощью микропроцессоров. Такое моделирование дает возможность более глубоко исследовать структуру электрического тока в анизотропных кристаллах и пленках. Все результаты вычислений получены по формулам, обработаны и представлены в виде моделей на микропроцессоре с помощью пакета MathCAD 13 или MATLAB [6]. Расчеты велись для квадратных образцов с размерами $a = b = n \cdot s$, где величина n повышалась от 3 до $\sim \infty$, а расстояние между измерительными зондами $s = 1$ мм. На рис. 3, в качестве примера, приведены рассчитанные значения поправочных коэффициентов L_1 и L_2 в широком диапазоне значений анизотропии $\gamma = \sqrt{\sigma_x / \sigma_y}$ от 10^{-2} до 10^2 . Из приведенных графиков (рис. 3) очевидно, что зависимости поправочных коэффициентов L_1 и L_2 от величины анизотропии γ имеют подобные, но зеркально отраженные зависимости (рис.3, зависимости 1-3, 7 и 4-6, 8). С увеличением значения n степень зависимости поправочных коэффициентов L_1 и L_2 уменьшается (рис. 3, зависимости 1 и 3, 4 и 6). В пределе при значении $n \geq 50$, зависимости поправочных коэффициентов L_1 и L_2 вырождаются в прямую линию (рис.3, зависимости 7 и 8), при этом значения $L_1 = L_2 = 0,2206$ и не зависят от коэффициента анизотропии γ

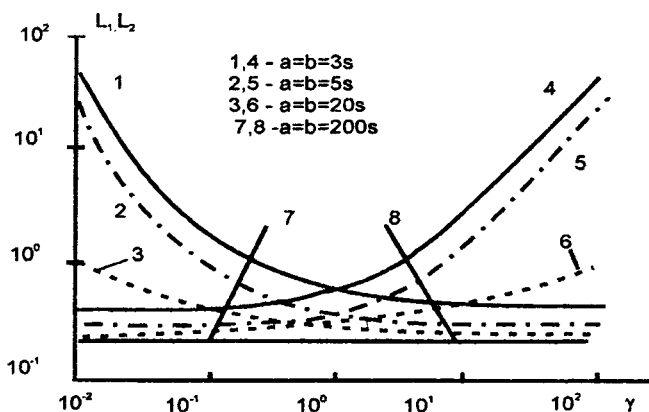


Рис. 3

Процесс измерения элетросопротивлений состоит в следующей последовательности.

- При заданной одинаковой величине токов $I_{58} = I_{14}$ необходимо провести два независимых измерения напряжений U_{23} и U_{67} при различных положениях зондового измерителя (рис.2,а,б) вначале на поверхности образца на оси его симметрии при $y = b/2$ вдоль линии, параллельной оси x , а затем вдоль линии, параллельной оси y при $x = a/2$.

- Определяем отношение напряжений U_{23} / U_{67} .

- При известных геометрических параметрах образца a , b , d и расстоянии между измерительными зондами s проводим по выражениям (17 и 18) вычисление значений поправочных коэффициентов L_1 и L_2 в табличной форме, при этом величина анизотропии задается априори $\gamma = var$.

- При известных рассчитанных значениях коэффициентов L_1 и L_2 по выражению (19) рассчитываем теоретические значения H при $\gamma = var$.

- Из полученных теоретических расчетов и по измеренному значению $H = U_{23} / U_{67}$ находим значение коэффициента анизотропии γ .

- По выражениям (11) и (12) при известных значениях измеренных значений токов I_{58} , I_{14} и напряжений U_{23} и U_{67} , а также с учетом геометрических размеров измеряемого образца a , b , d и уточненных значений поправочных коэффициентов L_1 и L_2 определяем значения составляющих σ_x, σ_y тензора проводимости анизотропного полупроводникового материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батавии В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. - М.: Радио и связь, 1985. — 264 с.
2. Шевченко А.Е., Поляков Н.Н. Определение компонент тензора удельного сопротивления полупроводниковых монокристаллов и пленок // - Заводская лаборатория, 2001, №6. — С.25-29.
3. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. — М.: Наука, 1960, т. 3. — 656 с.
4. Самойлович А.Г., Коренблит Л.Л.//ФТТ, 1961, т. 3, №4. С. 2054-2059.
5. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. — М.: Высшая школа, 1987.-240с.
6. Дьяконов В. MathCAD 13: учебный курс. — СПб.: Питер, 2001. -624с.
7. Поляков Н. Н., Карлов А.В., Филиппов В.В. Измерение электропроводности анизотропных полупроводниковых пластин и пленок // - Заводская лаборатория. 2004, № 3. - С.27-31.

БЕСПРОВОДНАЯ СЕТЬ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ – WiMAX

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Современные технологии беспроводной передачи информации охватывают следующий спектр назначений:

- радиовещание (DAB);
- цифровое телевидение (DVB, ATSC);
- сотовая телефония (GSM с расширением GPRS и EDGE, CDMA, 3G);
- персональные беспроводные сети с технологией Bluetooth, ZigBee, IEEE 802.15.1, 3/3a;
- локальные беспроводные сети IEEE 802.11 a/b/g и DECT
- спутниковые сети и региональные широкополосные сети стандарта 802.16

В настоящей статье рассматриваются вопросы технологии наиболее перспективной беспроводной сети передачи информации основанной на международном стандарте IEEE 802.16

В настоящее время часто сравнивают такие современные и наиболее популярные технологии передачи данных, как WiMAX и Wi-Fi. Несмотря на то, что обе технологии имеют созвучные названия и WiMAX технология появилась позже, то можно предположить, что WiMAX это усовершенствованная модель Wi-Fi, но это не так. Эти технологии имеют различные области применения. Wi-Fi является технологией, в основном предназначенной для организации небольших беспроводных сетей внутри помещений и построения беспроводных мостов. Технология WiMAX, в свою очередь, предназначена для организации широкополосной связи вне помещений и для организации крупномасштабных сетей. WiMAX разрабатывался как городская вычислительная сеть (MAN). Рассмотрим некоторые другие различия между этими технологиями. У WiMAX лучше качество связи, чем у Wi-Fi. Когда несколько пользователей подключены к точке доступа Wi-Fi, они часто конфликтуют и борются за право доступа к каналу связи. В свою очередь, технология WiMAX обеспечивает каждому пользователю постоянный доступ. Построенный на технологии WiMAX алгоритм устанавливает ограничение на число пользователей для одной точки доступа. Когда базовая станция WiMAX приближается к максимуму своего потенциала, она автоматически перенаправляет «избыточных» пользователей на другую базовую станцию.

Таблица 1–Сравнительная таблица стандартов беспроводной связи

Технология	Стандарт	Пропускная способность	Радиус действия	Частоты
Wi-Fi	802.11a	До 54 Мбит/с	До 100 м	5.0 ГГц
Wi-Fi	802.11b	До 11 Мбит/с	До 100 м	2.4 ГГц
Wi-Fi	802.11g	До 108 Мбит/с	До 100 м	2.4 ГГц
Wi-Fi	802.11n	До 300-600 Мбит/с	До 100 м	2.4-2.5 или 5.0 ГГц
WiMax	802.16d	До 75 Мбит/с	До 6000-10000 м	1.5-11 ГГц
WiMax	802.16e	До 30 Мбит/с	До 1000-5000 м	2-6 ГГц
WiMax	802.16m	До 1000-100 Мбит/с	-----	

Стоимость устройств

Wi-Fi технология является более технически проработанной нежели WiMAX и сегодня Вы вряд ли найдете новый ноутбук без встроенного Wi-Fi модуля. Возможно только временным недостатком является то, WiMAX оборудование стоит дороже Wi-Fi оборудования и ассортимент WiMAX оборудования более ограниченный. Это вызвано тем, что технология WiMAX более молодая. Производство устройств, оборудованных WiMAX модулем, только начало развиваться и до уровня оборотов Wi-Fi устройств ему еще далеко. Стоимость базовых станций WiMAX также выше из-за дополнительных дорогостоящих компонентов.

Области применения

WiMAX хорошо подходит для решения следующих задач:

- Соединения точек доступа Wi-Fi друг с другом и другими сегментами Интернета.
- Обеспечения беспроводного широкополосного доступа как альтернативы выделенным линиям и DSL.
- Предоставления высокоскоростных сервисов передачи данных и телекоммуникационных услуг.
- Создания точек доступа, не привязанных к географическому положению.

WiMAX позволяет осуществлять доступ в Интернет на высоких скоростях, с гораздо большим покрытием, чем у Wi-Fi сетей. Это позволяет использовать технологию в качестве «магистральных каналов», продолжением которых выступают традиционные DSL- и выделенные линии, а также локальные сети. В результате подобный подход позволяет создавать масштабируемые высокоскоростные сети в рамках целых городов.

Следует отметить, что как и во многих других областях, в беспроводной передаче данных нет универсальной технологии. Под каждую конкретную задачу больше подходит WiMAX или Wi-Fi. Если стоит задача предоставить широкополосный доступ к сети для пользователей – то больше, конечно подходит WiMAX, так как эта технология изначально была разработана именно с этой целью. Если стоит задача предоставить широкополосный доступ в ограниченном помещении, то технологии Wi-Fi и WiMAX одинаково хорошо подходят для решения, при условии что низкий уровень помех или помехи вовсе отсутствуют. А для внедрения беспроводных систем безопасности или видеонаблюдения больше подходит Wi-Fi. К тому же это направление уже достаточно развито.

Таблица 2–Охват и масштабы

<i>Wi-Fi (IEEE 802.11)</i>	<i>WiMAX (IEEE 802.16)</i>
беспроводные решения внутри зданий	беспроводные решения вне зданий
Точка – точка (PtP -Point to point)	Точка – много точек (PtMp – Point to multipoint)
сети небольшого масштаба (примерно 100м)	огромные беспроводные сети (7-10 км)
проблема «скрытого» узла (CSMA\CA)	Отсутствие проблемы «скрытого» узла (DAMA-TDMA)
Простые модуляции (64 бит) в стандартах a,g	Комплексная техника модуляции (256 бит)
Построение беспроводных мостов на дальние расстояния с применением множества ретрансляторов	Дальние беспроводные мосты без применения множества ретрансляторов

Масштабируемость и пропускная способность

<i>Wi-Fi (IEEE 802.11)</i>	<i>WiMAX (IEEE 802.16)</i>
Продолжение таблицы 2	
Фиксированная ширина полосы пропускания канала (20МГц)	Гибкая ширина полосы пропускания (1.5 - 20 МГц)
Несколько непересекающихся каналов (3-5)	Множество непересекающихся каналов
Максимальная скорость передачи данных – 54Мбит/с (зависит от ширины полосы)	Максимальная скорость передачи данных – 70Мбит/с при ширине полосы 20 МГц

IEEE 802.11 (Wireless LAN) представляет собой семейство стандартов "Wireless Ethernet". WiMAX (802.16) призван стать технологией широкополосного доступа вне помещений, в то время как стандарт Wi-Fi (802.11) предназначен для Беспроводных решений, в основном внутри помещений. Предприятия с огромными площадями, возможно, захотят перейти на WiMAX, чтобы избежать покупки большого количества репитеров, требуемых при установке Wi-Fi сети.

WiMAX (англ. *Worldwide Interoperability for Microwave Access*)–телекоммуникационная технология, разработанная с целью предоставления универсальной беспроводной связи на больших расстояниях для широкого спектра устройств (от рабочих станций и портативных компьютеров до мобильных телефонов). Основана на стандарте IEEE 802.16, который также

называют Wireless MAN. Название «WiMAX» было создано WiMAX Forum — организацией, которая была основана в июне 2001 года с целью продвижения и развития технологии WiMAX. Форум описывает WiMAX как «основанную на стандарте технологию, предоставляющую высокоскоростной беспроводной доступ к сети, альтернативный выделенным линиям и DSL»

Фиксированный и мобильный вариант WiMAX

Набор преимуществ присущ всему семейству WiMAX, однако его версии существенно отличаются друг от друга. Разработчики стандарта искали оптимальные решения как для фиксированного, так и для мобильного применения, но совместить все требования в рамках одного стандарта не удалось. Хотя ряд базовых требований совпадает, нацеленность технологий на разные рыночные ниши привела к созданию двух отдельных версий стандарта (вернее, их можно считать двумя разными стандартами). Каждая из спецификаций WiMAX определяет свои рабочие диапазоны частот, ширину полосы пропускания, мощность излучения, методы передачи и доступа, способы кодирования и модуляции сигнала, принципы повторного использования радиочастот и прочие показатели. А потому WiMAX-системы, основанные на версиях стандарта IEEE 802.16 e и d, практически несовместимы. Краткие характеристики каждой из версий приведены ниже.

802.16-2004 (известен также как 802.16d и фиксированный WiMAX). Спецификация утверждена в 2004 году. Используется ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM), поддерживается фиксированный доступ в зонах с наличием либо отсутствием прямой видимости. Пользовательские устройства представляют собой стационарные модемы для установки вне и внутри помещений, а также PCMCIA-карты для ноутбуков. В большинстве стран под эту технологию отведены диапазоны 3,5 и 5 ГГц. По сведениям WiMAX Forum, насчитывается уже порядка 175 внедрений фиксированной версии. Многие аналитики видят в ней конкурирующую или взаимодополняющую технологию проводного широкополосного доступа DSL.

802.16-2005 (известен также как 802.16e и мобильный WiMAX). Спецификация утверждена в 2005 году. Это — новый виток развития технологии фиксированного доступа (802.16d). Оптимизированная для поддержки мобильных пользователей версия поддерживает ряд специфических функций, таких как хэндовер(англ.), *idle mode* и роуминг. Применяется масштабируемый OFDM-доступ (SOFDMA), возможна работа при наличии либо отсутствии прямой видимости. Планируемые частотные диапазоны для сетей Mobile WiMAX таковы: 2,3-2,5; 2,5-2,7; 3,4-3,8 ГГц. В мире реализованы несколько пилотных проектов, в том числе первым в странах СНГ (конкретнее, в России) свою сеть развернул «Скартел». Конкурентами 802.16e являются все мобильные технологии третьего поколения (например, EV-DO, HSDPA).

Основное различие двух технологий состоит в том, что фиксированный WiMAX позволяет обслуживать только «статических» абонентов, а мобильный ориентирован на работу с пользователями, передвигающимися со скоростью до 120 км/ч. Мобильность означает наличие функций роуминга и «бесшовного» переключения между базовыми станциями при передвижении абонента (как происходит в сетях сотовой связи). В частном случае мобильный WiMAX может применяться и для обслуживания фиксированных пользователей.

В общем виде WiMAX сети состоят из следующих основных частей: базовых и абонентских станций, а также оборудования, связывающего базовые станции между собой, с поставщиком сервисов и с Интернетом.

Для соединения базовой станции с абонентской используется высокочастотный диапазон радиоволн от 1,5 до 11 ГГц. В идеальных условиях скорость обмена данными может достигать 70 Мбит/с, при этом не требуется обеспечения прямой видимости между базовой станцией и приемником.

WiMAX применяется как для решения проблемы «последней мили», так и для предоставления доступа в сеть офисным и районным сетям.

Между базовыми станциями устанавливаются соединения (прямой видимости), использующие диапазон частот от 10 до 66 ГГц, скорость обмена данными может достигать 120 Мбит/с. При этом, по крайней мере одна базовая станция подключается к сети провайдера с использованием классических проводных соединений. Однако, чем большее число базовых станций подключено к сетям провайдера, тем выше скорость передачи данных и надёжность сети в целом.

Структура сетей семейства стандартов IEEE 802.16 схожа с традиционными GSM сетями (базовые станции действуют на расстояниях до десятков километров, для их установки не обязательно строить вышки — допускается установка на крышах домов при соблюдении условия прямой видимости между станциями).

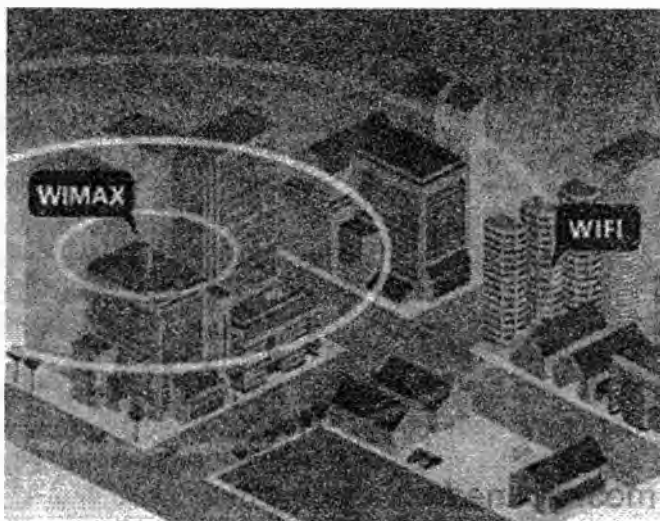


Рис. 1. Сравнение радиуса действия сетей Wi-Fi и WiMAX

Сопоставления WiMAX и Wi-Fi далеко не редкость, возможно, потому, что эти термины созвучны, название стандартов, на которых основаны эти технологии, похожи (стандарты IEEE, оба начинаются с «802.»), а также обе технологии используют беспроводное соединение и используются для подключения к интернету (каналу обмена данными). Но несмотря на это, эти технологии направлены на решение совершенно различных задач.

- WiMAX это система дальнего действия, покрывающая километры пространства, которая обычно использует лицензированные спектры частот (хотя возможно и использование нелицензированных частот) для предоставления соединения с интернетом типа точка-точка провайдером конечному пользователю. Разные стандарты семейства 802.16 обеспечивают разные виды доступа, от мобильного (схож с передачей данных с мобильных телефонов) до фиксированного (альтернатива проводному доступу, при котором беспроводное оборудование пользователя привязано к местоположению).
- Wi-Fi это система более короткого действия, обычно покрывающая десятки метров, которая использует нелицензированные диапазоны частот для обеспечения доступа к сети. Обычно Wi-Fi используется пользователями для доступа к их собственной локальной сети, которая может быть и не подключена к Интернету. Если WiMAX можно сравнить с мобильной связью, то Wi-Fi скорее похож на стационарный беспроводной телефон.

Из-за дешевизны и простоты установки, Wi-Fi часто используется для предоставления клиентам быстрого доступа в Интернет различными организациями. Например, в некоторых кафе, отелях, вокзалах и аэропортах можно обнаружить бесплатную точку доступа Wi-Fi.

WiMAX в Беларуси и в мире

- Компания «Скартел» под торговой маркой «Yota-Бел» развертывает сеть в г. Гродно
- 31 марта 2010 года РУП «Белтелеком» в г. Минске ввел в действие 22 базовых станции сети WiMAX.

Национальный оператор "Белтелеком" открыл в Беларуси сети WiMAX 31 марта 2010.

На стартовом этапе сеть WiMAX "Белтелеком" насчитывает 22 базовые станции в Минске с дальнейшим расширением до трех сотен по итогам года.

Абонентам с самого начала работы WiMAX-сети предложено 4 тарифных плана, два из которых – без ограничений по трафику.

Для доступа к сети абонентам предложены USB-модемы производства Huawei.

РУП "Белтелеком" выделен сквозной частотный диапазон 3,5 ГГц для развертывания сетей WiMAX по всей стране. Кроме Минска и пригорода в 2010 году оператор собирается покрыть WiMAX "как минимум" все областные центры.

— В планах компании — 101 базовая станция к концу года в Минске и 270 — в других городах Беларуси, — рассказали в пресс-службе. — Однако быстрый прирост территории покрытия WiMAX зависит от выдачи новых полос частот оператору — 2,3—2,5 ГГц.

«Белтелеком» подал соответствующую заявку и ожидает решения по выдаче ему необходимых частот.

Компания намерена начать «тестово-коммерческую эксплуатацию» — одновременное предоставление коммерческих услуг и продолжение тестирования сети.

Подключиться к WiMAX можно только при условии заключения контракта с оператором.

Помимо "Белтелекома", сеть WiMAX в Беларуси будет строить и российский оператор Yota (2,6 ГГц) — во второй половине года компания готовится запустить сегмент WiMAX-сети в Гродно, с дальнейшим покрытием всей страны.

По данным аналитической компании In-Stat, к 2013 году количество абонентов WiMAX будет в 5 раз превышать абонентскую базу сетей LTE. 3GPP Long Term Evolution (LTE) — это новый мобильный протокол передачи данных (Long Term Evolution). Проект 3GPP является стандартом по совершенствованию технологий CDMA, UMTS для удовлетворения будущих потребностей в скорости передачи данных.

Активному внедрению LTE пока препятствуют усилия операторов по развитию сетей третьего поколения HSPA и HSPA+. Кроме того, у новой технологии есть еще как технические, так и патентные проблемы, которые также тормозят переход к ней.

Массовое появление телефонов с поддержкой LTE ожидается не ранее второй половины 2012 года. Первыми абонентскими LTE-терминалами станут адаптеры, сетевые карты и USB-модемы.

Как сообщается в пресс-релизе WiMAX Forum, в настоящее время количество пользователей сетей WiMAX составляет около 620 млн. человек. Ожидается, что к концу текущего года этот показатель достигнет 800 млн. пользователей, а к 2012-му превысит 1 млрд. Пока лидером по темпам внедрения технологии WiMAX является Азиатско-Тихоокеанский регион.

Эксперты уверены, что, несмотря на медленные темпы восстановления мировой экономики, сети WiMAX продолжают стремительное развитие. Основной движущей силой распространения технологии остается появление большого количества устройств с поддержкой стандарта WiMAX.

Ожидается, что в 2010 году WiMAX-сетями будут полностью охвачены Нью-Йорк, Сан-Франциско и Хьюстон. При этом к концу года только в США через WiMAX в интернет будут выходить около 120 млн. пользователей.

ЛИТЕРАТУРА

1 Международный стандарт IEEE 802.11-16. 2 Сюваткин, В.С. WiMAX — технология беспроводной связи: теоретические основы, стандарты, применение. / В.С. Сюваткин, В.И. Есипенко, И.П. Ковалев, В.Г. Сухоробров, под ред. В.В. Крылова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 354 с. 3 Колешко В. М., Сунка В.Я. Качан. В.В. Широкополосные беспроводные сети для интеллектуальных сенсорных систем. —Сб. «Машиностроение» 2010, вып.25.-Стр.377-382 4 Шахнович, И.В. Современные технологии беспроводной связи / И.В. Шахнович, - М.: Техносфера, 2006. — 288с. 5 Колешко. В.М., Сунка В.Я., Полюнкова. Е.В, Интеллектуальная система распознавания информационных образов с поддержкой стандартов беспроводной связи. -19-я международная конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, Украина, 2009. — С.382-383.

РЕФЕРАТЫ

ТЕОРИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ, МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН

УДК 621.83

Авсиевич А.М., Реут Л.Е., Дубовская Е.М. Анализ факторов износа в высших кинематических парах // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 6.

Рассмотрена проблема моделирования изменения формы профилей звеньев, составляющих высшую кинематическую пару, в результате изнашивания. Показано, что интенсивность изнашивания во многом зависит от геометрических характеристик профилей. Приведен алгоритм расчета координат изношенных профилей. – Библиогр. 4.

УДК 621.01

Анципорович П.П., Авсиевич А.М., Дворянчикова А.Б., Николаев В.А. Особенности методики изложения раздела «Кинематика зубчатых механизмов» в курсе «Теория механизмов и машин» // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 9.

Изложены особенности методики обучения кинематике зубчатых механизмов в курсе теории механизмов и машин. Показано, как преодолеть трудности, связанные с тем, что курс деталей машин излагается после окончания изучения теории механизмов и машин. – Ил. 12. Библиогр. 6.

УДК 621.01

Анципорович П.П., Акулич В.К. Учет трения при силовом расчете механизмов и составлении уравнения движения // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 14.

Рассмотрены вопросы учета сил трения при составлении и численном решении дифференциального уравнения движения звена приведения путем введения в него приведенного момента сил трения. На кафедре теории механизмов и машин бгпу разработано соответствующее программное обеспечение. – ил. 4. Библиогр. 4.

УДК 621.01

Анципорович П.П., Дворянчикова А.Б., Галаев К.О. Использование информационных технологий при выполнении курсового проекта по теории механизмов и машин // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 18.

Рассмотрена методика применения информационных технологий в курсовом проектировании по теории механизмов и машин. Инновационность методики проектирования заключается в гармоничном сочетании графических и аналитических методов проектирования, позволяющем повысить качество проектирования и избежать роста трудозатрат студентов. – Ил. 5. Библиогр. 5.

УДК 621.01.752

Анципорович П.П., Кудин В.В. Уравновешивание вращающихся масс в теории механизмов и машин // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 22.

Рассматривается раздел уравновешивание вращающихся звеньев курса «Теория механизмов и машин», в котором даны основные теоретические положения неуравновешенности ротора, пути устранения этой неуравновешенности, остаточная (допустимая) неуравновешенность, способы и средства достижения этой допустимой неуравновешенности. – Ил. 7. Библиогр. 3

УДК 621.01: 681.3 + 621.876

Астахов Э.И., Гарах В.А., Шкурко С.С. Сравнительный анализ схем приводов механизмов ножничных подъемников // Машиностроение – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 26.

Рассмотрены три схемы привода ножничных подъемников, содержащих шарнирно рычажный механизм подъема рабочей площадки с грузом. Показано, что в схеме с вертикальным боковым расположением ведущего гидроцилиндра обеспечивается наименьшая сила при заданной силе веса поднимаемого груза. – Ил.3. Библиогр. 3.

УДК 372.862

Бачанцев А.И., Гриневиц Е.А. Особенности преподавания технических дисциплин студентам экономических специальностей // Машиностроение.— Минск, 2012.—Вып. 26. Т.2—С. 30.

Лекция выступает в качестве ведущего звена всего курса обучения. Однако традиционная вузовская лекция имеет ряд недостатков: лекция приводит к пассивному восприятию чужих мнений; во время лекций студенты не внимают произносимым словам 40% времени; в первые 10 минут студент запоминает 70% информации, а в последние 10 минут – 20%; через 4 месяца студенты только на 10% лучше знают дисциплину, чем другие, которым лекцию не читали; на лекции одни слушатели успевают осмыслить, другие – только механически записать слова лектора.

Однако опыт обучения в высшей школе свидетельствует о том, что отказ от лекции снижает научный уровень подготовки обучающихся, но должна претерпевать определенные изменения, которые можно отнести к инновационным формам подачи материала. В основе таких форм лекций лежат следующие принципы контекстного обучения: Принцип проблемности, принцип игровой деятельности, принцип диалогического общения, принцип совместной коллективной деятельности.

К видам «нетрадиционных» лекций можно отнести следующие: Проблемная лекция, лекция с запланированными ошибками (лекция – провокация), лекция – визуализация.

Анализ использования лекции – визуализации позволяет заявить, что данный тип подачи материала наиболее приемлем для обучения студентов экономических специальностей техническим дисциплинам, так как вместо непонятных для аудитории терминов они получают наглядное изображение или видео материал того или иного механизма или процесса. Ил.нет, Табл.нет, Библ.11.

УДК 688.1.037.97+666.271

Сухоцкий А.А., Дворянчикова, А.Б. Особенности расчета механизма перемещения верхнего рабочего диска инструмента для пневмоцентробежной обработки // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 33.

Изложены особенности расчета механизма перемещения верхнего рабочего диска в инструменте для пневмоцентробежной обработки. Показано, как вычислить значения основных параметров такого механизма. – Библиогр. 2.

УДК 372.862

Шахрай Л.И. Проблема формирования профессиональной самостоятельности будущих инженеров // Машиностроение. – Минск, 2012. – Release 26. Vol. 2. Т.2. – С. 37.

Рассмотрены проблемы формирования профессиональной самостоятельности будущих инженеров машиностроительной отрасли. Выявлена степень разработанности проблемы формирования профессиональной самостоятельности студентов технического вуза в педагогической теории и практике. – Табл.1. Библиогр.6

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ; ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.9

Беляева Г.И., Беляев Г.Я., Кочергин А.И. Влияние химсостава и структуры на обрабатываемость сталей резанием // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 43.

В данной работе приводятся результаты исследований обрабатываемости стали 20ХНЗА, которая часто используется для изготовления шестерен, ступенчатых валов и других ответственных деталей. Показано влияние режимов термообработки на образующиеся при этом микроструктуры стали. Рассмотрены результаты зависимостей износа режущего инструмента от способа охлаждения после термообработки и от микроструктуры. Установлены достаточно сильные влияния бейнита на износ режущего инструмента и скорости резания при точении стали со структурой Б+Ф на обрабатываемость стали 20ХНЗА. – Ил. 3. Библиогр. 5.

УДК 37.091.3

Гордиенко А. В. Определение геометрической составляющей шероховатости обработанной поверхности как пример решения инженерной задачи в учебном процессе // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 47.

Затрагивается проблема использования математических знаний студентами при изучении специальных дисциплин. Выводится формула для определения геометрической составляющей шероховатости обработанной поверхности при несвободном резании резцом с незакругленной вершиной. – Ил. 1. Библиогр. 1.

УДК 621.91.04

Данилов В.А.. Формирование многогранных поверхностей на базе циклоидальных кривых // Машиностроение. – Минск 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 50.

Рассмотрены схемы формирования циклоидальных кривых применительно к механической обработке методом следа многогранных моментопередающих поверхностей деталей машин, основанные на сообщении инструменту и заготовке согласованных вращательных движений. Дан анализ схем обработки резцовыми головками внешнего касания и охватывающего типа, влияния их геометрических и кинематических параметров на технологические возможности по форме образуемых поверхностей. Показана возможность реализации схем обработки на отечественном оборудовании созданными инструментами. – Ил.5. Библ.5.

УДК. 621. 791

Дечко Э.М., Воронович А.В. Исследование напряжений в области контакта твердосплавных пластин и корпусов фрез различных конструкций // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 56.

Интенсификация процессов резания при фрезеровании за счет применения высокоскоростных станков, увеличения режимов резания, объемов снимаемого припуска металла, использования новых инструментальных материалов и конструкций инструментов выявило ряд проблем, связанных с возрастанием центробежных сил в 3-10 раз, вызывающих раскрепление режущих пластин, кассет с пластинами, разрушение пластин, возникновение вибраций и др. Для улучшения конструкций концевых фрез, снижения вибраций предложено тангенциальное расположение пластин.

В БНТУ выполнено исследование влияния предлагаемого конструктивного изменения режущей части фрез на напряжения в зоне крепления пластин.

УДК 621.941

Ивашин Э.Я., Ивашин В.Э. Метод обработки лопаток турбин // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 63.

Изложена сущность метода обработки нежестких деталей сложной формы типа лопаток газовых турбин. – Библиогр.3.

УДК 621.9

Кочергин А.И., Ажар А.В., Ратько Е.Ф. Анализ причин выхода из строя и характера повреждения комбинированного инструмента для обработки отверстий в корпусных деталях // Машиностроение.— Минск, 2012.—Вып. 26. Т.2 – С. 64.

Проведены исследования характера повреждения и рассеивания величин износа сменных неперетачиваемых пластин (СНП) сборных комбинированных инструментов для обработки отверстий в момент съема со станка. Установлено, что на гранях пластин при обработке чугуна преобладает износ по задней поверхности. Выявлена разница величин среднего износа СНП, расположенных на разных ступенях комбинированного инструмента, что связано с разными условиями нагружения последних. При обработке крепежных отверстий комбинированными борштангами лимитирующей является периферийная пластина 1-ой ступени. Выявлен разброс значений износа в момент замены инструмента, что связано в первую очередь с разбросом механических свойств и качества поверхности материала заготовок, а также с возможностью нерегламентированной замены инструмента. В качестве количественного критерия отказа комбинированного инструмента предложено использовать величину среднего износа по задней поверхности. Предложены пути повышению ресурса сборного комбинированного инструмента на этапах конструкторской, технологической и организационно-технической подготовки производства. - Ил.6, Табл.2, Библ.12.

УДК 621.9

Кочергин А.И., Ажар А.В., Ратько Е.Ф., Бачанцев А.И. Определение критериев замены комбинированных осевых инструментов в производственных условиях // Машиностроение.— Минск, 2012.—Вып. 26. Т.2 – С. 70.

В ходе исследований установлено, что наиболее характерным видом повреждения режущих граней сменных неперетачиваемых пластин (СНП) комбинированных борштанг при обработке чугуна в момент съема со станка является износ по задней поверхности. В результате статистической обработки результатов измерений найдены эмпирические распределения предельного износа и поставлены им в соответствие теоретические законы распределения с использованием специально разработанного алгоритма и программного обеспечения. Проверка гипотезы согласия полученных зависимостей по критерию Колмогорова показала, что рассеивание износа наилучшим образом описывается нормальным законом в усеченной области исследуемых величин. Таким образом, в качестве количественного критерия затупления инструмента можно использовать величину среднего износа наиболее нагруженной (периферийной) пластины. Результаты работы могут быть использованы для создания автоматизированной экспертной системы управления процессом механической обработки различными типами режущих инструментов. - Ил.3, Табл.1, Библ.7.

УДК 621.9.048.4

Луговой И. В. Обработка отверстий малого диаметра с использованием модулированных колебаний высокой частоты//Машиностроение. Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 74.

В статье приведен анализ известных методов и устройств обработки отверстий малого диаметра. Показано, что процессы обработки глубоких отверстий малого диаметра с криволинейными профилями представляют практический и научный интерес. Однако они недостаточно изучены. В работе предлагается новый метод обработки в хрупких материалах не вращающимся инструментом с использованием нежестких промежуточных элементов передачи ультразвука. Ил.3. Библиогр.: 3 назв.

УДК 621.793

Спиридонов Н.В., Кобяков О.С., Адаменко Д.В. К вопросу лазерного термоупрочнения деталей тракторной техники //Машиностроение. – Минск – 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 76.

В статье приводится информация об использовании лазерного термоупрочнения деталей сельскохозяйственной техники. Установлено, что использование лазерного нагрева, используемого в процессах термоупрочнения деталей, изготовленных из чугунов и конструкционных углеродистых сталей, позволяет многократно увеличить износостойкие свойства металлов и повысить ресурс работы тракторной техники.

УДК 621.762

Тумилович М.В.¹, Пилинович Л.П.², Шеко Г.А.², Тарайкович А.М.² Пористые порошковые материалы и устройств на их основе для очистки и осушки газов при отрицательных температурах. // Машиностроение. – Минск – 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 78.

Разработан пористый композиционный метало-полимерный материал и устройство на его основе для очистки и осушки газов при отрицательных температурах. Принцип работы устройства – отделение влаги за счет пропускания газа через фильтроэлемент из ППМ, помещенный в жидкий абсорбент (ЭГ, ДЭГ), температура замерзания которого ниже минус 60 °С и который имеет способность поглощения влаги из газа. Второй фильтроэлемент обеспечивает конденсацию паров абсорбента на его поверхности и, при образовании капель жидкости, их отделение от газа и возврат назад в камеру с жидким абсорбентом. Разработанное устройство может применяться в системах управления шаровыми кранами для очистки и сушки импульсного газа приборов автоматики на компрессорных станциях и газопроводах, а также для обеспечения работ пневмосистем автотранспорта при отрицательных температурах. – Ил.3. Библ.9.

УДК 621.9.011:517.962.1

Туромша В.И., Довнар С.С., Туми Эль-Мабрук Абуджафер Али. Оценка жесткости опор стола продольно-фрезерного станка методом конечных элементов // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 81.

Проведено конечно-элементное моделирование упругих деформаций в опорах стола продольно-фрезерного станка. Исследованы винтовые опоры цилиндрической и призматической формы. Показано, что наиболее податливым элементом опоры является резьбовое соединение. Выяснено, что бетонное основание под опорой является достаточно жестким и отвечает примерно за ¼ упругих деформаций. Выявлено, что сдвиговая жесткость опор невелика по отношению к жесткости на сжатие. Обнаружен шарнирный эффект в поведении хорошо смазанной резьбы, дополнительно резко снижающий сдвиговую жесткость. Даны конструктивные и технологические рекомендации по повышению жесткости опор стола. –Ил. 3. Библиогр. 3.

УДК 621.95.01

Фельдштейн Е.Э. Сверление сквозных отверстий в молибдене сверлами с износостойкими покрытиями // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 87.

Рассмотрено влияние подачи и типа покрытия на образование заусенцев, форму стружки, характер изнашивания сверл и точность отверстий при сверлении сквозных отверстий в молибдене. Сравнивались покрытия BALINIT®FUTURA NANO (материал TiAlN с наноструктурой), BALINIT®HARDLUBE (материал TiAlN + WC/C, многослойное) и BALINIT®X-TREME (материал TiAlN, однослойное). При обработке молибдена заусенцы преимущественно имеют вид коротких фрагментов, расположенных по периметру отверстия. Наибольшая высота заусенцев зафиксирована при использовании покрытия X-TREME. Стружки при сверлении молибдена имеют вид коротких конических спиралей, характерных для обработки хрупких материалов. Форма стружек практически не зависит ни от подачи, ни от состава покрытия. Использование покрытий практически всегда увеличивает коэффициент утолщения стружки, иногда более чем в 2 раза. Износ сверл без покрытия значительно превышает износ сверл с покрытиями. Точность просверленных отверстий в большинстве случаев находится в пределах 10-11 квалитетов точности, однако покрытие „X-TREME” обеспечивает гораздо более высокую точность. – Ил.7. Табл.2. Библиогр. 1.

УДК 621.941

Фельдштейн Е.Э., Паха-Голенбиовска Х. Влияние инструментального материала на геометрическую структуру и микротвердость обработанной поверхности при точении антифрикционного чугуна // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 91.

Рассмотрено влияние инструментального материала и режима резания на шероховатость обработанной поверхности, ее топографию и микротвердость поверхностного слоя при точении легированного антифрикционного чугуна EN-GJS2131 с ферритно-перлитной микроструктурой. Наилучшие результаты обеспечивают пластины из кубического нитрида бора CBN 7050, наилучшие – пластины из твердого сплава K10. – Ил.6. Табл.1. Библиогр. 2.

УДК621.793.1

Фролов И.С., Иващенко С.А., Мрочек Ж.А. Конструирование композиционных вакуумно-плазменных покрытий для особых условий эксплуатации // *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Release 26. Vol. 2. Т.2. – С. 95.

Рассмотрен вопрос разработки вакуумно-плазменных покрытий для особых условий эксплуатации. Предложены конструкции мультислойных композиционных покрытий, обладающих необходимыми физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Описаны особенности формирования и способы получения мультислойных полосчатых и ступенчато-полосчатых покрытий. – Ил. 4. Библиогр. 3.

УДК 621.91.

Чарторыйский А. В., Шагун В.И., Руцкий Я.С., Алтунин С.В., Душутин А.В. Внедрение высокоскоростного фрезерования на производстве РУПП «БелАЗ»// *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 100.

Изложены результаты сравнительных испытаний торцевых фрез со сменными непереключаемыми пластинами фирмы «Kennametal» (США-Германия) с применением высокоскоростного фрезерования и фирмы «Pramet» (Чехия) на станке «Tos Varnsdorf» (Чехия), модель WHN 110/МС. Обрабатываемая деталь: «крышка шестерен привода» изготовленная из чугуна СЧ20 ГОСТ 1412-85 с твердостью по Бринеллю (НВ) 217...241. – Ил.5. Библиогр.5. Табл.2.

МЕХАНИКА СТРУКТУР И МАТЕРИАЛОВ

УДК 629.11.011.5

Александров А.А., Пронкевич С.А., Куриленко В.В. Расчёт НДС рамы большегрузного самосвала с помощью инженерного пакета ANSYS// *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 104.

В данной статье рассматривается практика применения современных САД/САЕ систем при конструировании и расчёте на прочность рамы самосвала большой грузоподъёмности.

УДК 539.3

Василевич Ю.В., Неумержицкая Е.Ю., Галуза И.М. Методика расчета термоупругого состояния анизотропной пластинки, ослабленной эллиптическим отверстием // *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 106.

Изложена методика расчета напряженно-деформированного состояния ортотропной пластинки с эллиптическим отверстием.

УДК 539.4

Василевич Ю.В.; Остриков О.М. Теория негомогенной пластичности деформируемых аморфных твердых тел // *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 111.

Разработана квазидислокационная теория негомогенной пластической деформации твердых тел. На основании теории проведен расчет полей напряжений у полосы сдвига. – Ил. 5. Библиогр. 4.

УДК 539

Дикан Ж.Г., Ларченков Л.В. Механика композиционных структур // *Машиностроение*. – Минск - 2012. - Вып. 26. Т.2 - С. 116.

Рассмотрены некоторые вопросы строения и механики композиционных структур, виды и применение композиционных структур, строение двойных металлических систем. - Ил.2. Табл.2. Библиогр.11.

УДК 621.1; 621,7.

Зубко С.А. Рост трещины в вершине при испытании стального образца на разрыв. // Машиностроение. – Минск, 2012 – Вып. 26. Т.2 – С. 121.

Рассмотрен процесс роста трещины в ее вершине при испытании стального образца на разрыв. При приложении растягивающей нагрузки, направленной на увеличение раскрытия трещины, в процессе повышения напряженного состояния происходит накопление поля деформаций в районе вершины трещины. Поле деформаций накапливается в виде слоистого языка в направлении роста вершины трещины, и при достижении определенной длины наступает момент разрыва материала в зоне накопленного поля деформаций с последующим понижением напряженного состояния материала и увеличением длины вершины трещины на зону поля деформаций. Дальнейшее повышение разрывного усилия приводит к последующему накоплению деформаций, формированию новой «языковой» деформационной зоны, ее прорыву и дальнейшему росту трещины. Рост трещины происходит ступенчато, скачками. -- Ил.1. Библиогр.5.

УДК 621.039.5.01/08

Клус С.А., Ширвель П.И., Глембоцкий А.В. Оценка напряженного состояния чехла тепловыделяющей сборки атомного реактора / Машиностроение: – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 124.

Разработана теория для определения напряженно-деформированного состояния чехла тепловыделяющей сборки атомного реактора. Выведены основные формулы, описывающие поведение призматической оболочки под действием неравномерного нагрева и радиационного облучения. Построены эпюры характеризующие распределение перемещений и напряжений под действием указанных нагрузок. – Ил. 16. Библиогр. 5.

УДК 621.81:539.4

Куриленко В.В., Пронкевич С.А., Александров А.А. Анализ НДС планетарного редуктора.// Машиностроение. – Минск: 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 131.

В данной статье рассматривается практика применения современных CAD/CAE средств при проектировании и расчетах редукторов самосвалов большой грузоподъемности.

УДК 538.911

Неумержицкая Е.Ю. Морфология поверхности быстрозатвердевших фольг алюминия и его сплавов с переходными элементами // Машиностроение.- Минск, 2012.– Вып. 26. Т.2.– С. 134.

Рассмотрена морфология поверхности быстрозакаленных фольг алюминия и его сплавов с переходными металлами. Исследовано распределение температуры по толщине пластины. – Ил. 2. Библиогр.8.

УДК 531.66

Пронкевич С.А., Карташев Е.Л., Старовойтова О.Л. Использование конечно-элементного пакета LS-DYNA для моделирования удара. // Машиностроение. – Минск:2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 138.

В статье рассматривается возможность использования конечно-элементного пакета LS-DYNA для моделирования задач об ударе шара о плоскость и приводится решение тестовых задач.

УДК 62-756.6

Пронкевич А.С., Трухнов А.Л. Использование конечно-элементного пакета LS-DYNA для анализа пассивной безопасности автомобиля.// Машиностроение. – Минск:2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 142.

На примере расчета фронтального столкновения автомобиля Chevrolet C2500 Pickup с бетонным блоком, рассмотрелась возможность использования программы LS-DYNA для моделирования краш-теста. Ил. 7. Библиогр. 4.

УДК 621.793

Соколов И.О., Спиридонов Н.В., Володько А.С., Пилецкая Л.И. Исследование влияния износостойкости на долговечность тяжело нагруженных валов, упрочненных газотермическим напылением // *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 146.

В статье изложена методика определения долговечности деталей трибосопряжений, упрочненных газотермическим напылением, учитывающая условия их изнашивания. – Ил.2, Библиогр.15.

УДК 539.3+612.311

Скляр О. Н., Босяков С. М., Доста А. Н., Казакевич В. А. Определение внутренних усилий, возникающих в корнях опорных зубов мостовидного протеза // *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 150.

В работе получены выражения для реакций и реактивных моментов, возникающих в корнях зубов, являющихся опорами мостовидного протеза, при действии на протез сосредоточенной нагрузки. Численные результаты представлены в виде зависимостей реакций и реактивных моментов от координат точки приложения силы и угла наклона силы к определенной оси координат для клыка и двухкоренного премоляра. – Ил. 5. Библиогр. 4.

УДК 001.57: 681.7.027.72, 666.1.053.525

Чигарев А.В., Ковеня Т.А., Покульницкий А.Р., Солошенко Д.С. Моделирование процессов проектирования и производства оптических деталей // *Машиностроение*. – Минск. 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 156.

Смоделирован алгоритм обработки оптической детали при помощи мелкодисперсных абразивов. Особенностью является то, что инструмент осуществляет сьем материала за один проход лишь на определенных участках, выбранных по условию максимума и с учетом некоторых ограничений. Модель формообразования поверхности и сам процесс обработки созданы на основе использования пакета Mathematica. – Ил.4. Библиогр.8.

УДК 621.81:539.4

Чигарев А.В., Ручан М.В., Шукевич Т.В. Расчет толстостенных цилиндров // *Машиностроение*.—Минск,2012.— Вып. 26. Т.2 —С. 160.

Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния толстостенного цилиндра аналитическим методом и с помощью инженерного пакета ANSYS.— Ил.5.

УДК 621.039.5.01/08

Ширвель П.И., Клус С.А., Левчук А.В. Влияние механических нагрузок на напряженно-деформированное состояние тонкостенных цилиндрических оболочек в условиях ядерных реакторов // *Машиностроение*: – Минск, 2010. – Вып. 26. Т.2 – С.164 .

В статье рассматривается тонкостенная защитная оболочка в условиях облучения и термосилового воздействия. Получены разрешающие дифференциальные уравнения. Разработана математическая модель и алгоритм нахождения основных характеристик НДС оболочки, запрограммирована компьютерная программа нахождения решения поставленной терморadiационной квазистатической задачи в пакете Mathematica 5.0. Построены графические зависимости прогибов и напряжений от длины оболочки. Проведен сравнительный анализ полученных результатов в программной среде МКЭ ANSYS. – Ил. 15. Библиогр. 4.

УДК 539.3

Язневич А.М. Влияние коррозии на прочность стальной арматуры // *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 172.

Рассмотрены причины возникновения коррозии арматуры в железобетонных конструкциях. Приведена классификация коррозионных разрушений, видов трещин в бетоне. Описаны факторы, влияющие на снижение прочностных свойств арматурных стержней. - Ил. 5. Табл. 1. Библиогр. 4.

УДК 681.586

Баркалин В.В., Ивкина О.М. Моделирование микрожидкостного элемента биосенсора в пакете ANSYS CFX // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 180.

Рассмотрены особенности моделирования микрожидкостных элементов интегральных биосенсоров. Показано, что давление и скорость жидкости на входе в канал являются возможными управляющими параметрами биосенсора. – Ил. 6. Библиогр.2.

УДК 681.586: 534.2, 541.16

Баркалин В.В., Плетежов А.А. Моделирование ИК-спектров массива углеродных нанотрубок в пакете NAMD // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 184.

Рассмотрена возможность спектрального контроля геометрических параметров массивов углеродных нанотрубок. На основе молекулярно-динамического моделирования в пакете NAMD получены спектры поглощения электромагнитных волн в диапазоне частот 0 – 500 см⁻¹ в массивах с разным числом трубок и расстоянием между ними. Определена наиболее перспективная для контроля спектральная линия в окрестности 25 см⁻¹, коррелирующая с геометрическими параметрами массивов. – Ил. 3. Библиогр.4.

УДК 621.7.044.2

Загирняк М.В., Драгобецкий В.В., Пирогов Д.Л., Коноваленко А.Д., Маркевич А.Б. Модульная взрывоударная установка для получения нанопорошков, нанопокровов и нанолегирования // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 188.

Рассмотрены процессы дробления отходов твердых сплавов машиностроительного производства. Разработана новая технология - многостадийное совмещенное взрывоударное дробление твердосплавных отходов от одного заряда. Разработана модульная конструкция многокамерного взрывоударного контейнера. Приведены результаты экспериментальных исследований. Предложена математическая модель расчета параметров взрывной камеры. – Ил. 10.

УДК 536.2

Клус С.А., Покульницкий А.Р., Ширвель П.И. Моделирование взаимодействия топлива и оболочки твэла с помощью МКЭ в среде ANSYS // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 193.

Рассмотрены вопросы современных методов расчета конструкций и материалов ядерной энергетики. Предложена модель численного анализа напряженно-деформированного состояния твэла активной зоны АЭС. Смоделировано сечение твэла ядерного реактора с последующим решением температурной и термоупругой задачи в комплексе МКЭ ANSYS Workbench 11.0. Проведена проверка полученных результатов. – Ил.7. Табл.2. Библиогр.: 7 назв.

УДК 612.821:502.12

Колешко В.М., Воробей Е.А., Хмурович Н.А. Интеллектуальные мобильные системы управления когнитивным сознанием человека // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 199.

Рассмотрены особенности воздействия электромагнитных полей мобильных телефонов на жидкие биоинформационные среды и мозговые волны человека, проанализированы результаты изменения функциональности биосистемы организма при использовании мобильного телефона. Описана разработка мобильной интеллектуальной системы бесконтактной регистрации, передачи мозговой активности на расстояния и способы управления когнитивным сознанием человека для улучшения его творческих способностей и обеспечения безопасности жизнедеятельности. Табл. 2, илл. 4, библиогр. 14.

УДК 004.891.3

Колешко В.М., Гаджинский Т.Т., Чашинский А.С. Методы анализа и прогнозирования состояния объектов на основе изменения их параметров // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 209.

Описаны подходы для анализа объекта: сбор информации и прогнозирование состояния объекта. Представлено сравнение различных моделей, которые можно применять для работы с объектом. – Ил.1. Табл.1. Библиогр.1.

УДК 612.821.8:331.46:331.47

Колешко В.М., Гулай А.В., Воробей Е.А., Гаджинский Т.Т., Кукенов А.С., Мардас Д.В., Чашинский А.С. Программа WIS распознавания информационных образов // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 212.

Рассмотрены особенности получения и анализа многомерных сенсорных образов. Разработано интеллектуальное аппаратно-программное средство “WIS” для распознавания информационных образов. Ил. 2. Библиогр. 9.

УДК 621.3.082.4

Колешко, В. М., Гулай, А. В., Гулай, В. А. Самоорганизация поверхностных явлений при электронной обработке: акустический сенсорный контроль // Машиностроение. — Минск, 2012. — Вып. 26. Т.2 — С. 217.

Разработан способ контроля процессов самоорганизации в зоне электронной обработки по спектру акустических колебаний. Исследован режим приема шумоподобных акустических колебаний плоским пьезоэлектрическим сенсором. Выполнен контроль параметров широкополосных колебаний в образце при электронно-лучевой обработке. Установлена корреляция изменения амплитуды акустических колебаний с поверхностным рельефом зоны электронного воздействия. — Ил. 4.

УДК 621.3.084.2.017

Колешко В. М., Гулай А. В., Лысковский В. В., Гулай В. А., Крупская Е. В., Левченко Н. В. Сенсорные материалы на основе редкоземельных оксидов: моделирование электронных свойств // Машиностроение. — Минск, 2012. — Вып. 26. Т.2 — С. 222.

Выполнено моделирование атомно-структурных и электронных свойств редкоземельных оксидов как активных материалов сенсорных наносистем. Исследована электронная плотность, а также рассчитана зонная структура для оксидов самария и гольмия. Определена спиновая поляризация носителей заряда вблизи уровня Ферми, которая, например, для оксида самария составляет 48,72%. — Ил. 4. Табл. 1. Библиогр. 4.

УДК 631.5/9:004

Колешко В. М., Гулай А. В., Польшкова Е. В., Гулай В. А. Интеллектуальные сенсорные системы в машиностроении для технологии точного земледелия // Машиностроение. — Минск, 2012. — Вып. 26. Т.2 — С. 227.

Разработана интеллектуальная сенсорная система для точного земледелия на основе светового контроля почвы и определения параметров ее качества. Определены зависимости коэффициентов яркости отражающей поверхности от длины волны оптического излучения. — Ил. 2.

УДК 656

Колешко В.М., Рыженков О.Е. Интеллектуальная система распознавания дорожных знаков. // Машиностроение. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 229.

Объектом разработки является система распознавания дорожных знаков из движущегося автомобиля. В процессе работы выполнены следующие разработки: модуль распознавания дорожных знаков, принцип работы которого основан на поиске дорожных знаков на изображении по их цветовым и геометрическим характеристикам, и модуль сравнения пиктограмм знаков с эталонами. – Ил. 3. Библиогр. 6.

УДК 681.586

Колешко Л.А., Сунка В.Я. Пьезоэлектрические широкополосные микро-наноактюаторы // *Машиностроение*. – Минск, 2012. Вып. 26. Т.2 – С. 233.

Рассмотрены особенности расчета и стабильность параметров нового класса широкополосных пьезоэлектрических преобразователей для актюаторов широкого спектра использования. Показана перспективность использования широкополосных пьезоактюаторов. – Ил. 3. Библиогр. 9.

УДК 681.532, 586; 621.316, 398;004.912

Колешко В.М., Сунка В.Я., Воробей Е.А., Мардас Д.В. Сунка Е.В., Романович А.А., Храменков Д.В. Микрорежимная интеллектуальная сенсорная система измерения температуры // *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 239.

Разработана интеллектуальная сенсорная система измерения температуры частотным методом с передачей информации по беспроводной сети передачи информации (БСПИ) (до 10 километров). Составлена программа для микроконтроллера PIC16F84A для управления процессом измерения и обработки измеренной информации. Сформирован специализированный выходной код с идентификацией (TEDC) передачи информации по БСПИ. – Ил. 4. Библиогр. 5.

УДК 681. 586

Колешко В.М., Сунка В.Я., Кутовский В.Д. Особенности программирования микроконтроллеров для интеллектуальных систем // *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 244.

Представлены технические параметры и особенности программирования микроконтроллеров основных мировых производителей для интеллектуальных систем широкого спектра назначения. – Ил. 2. Библиогр. 7.

УДК 621.317.353.3; 620.171; 621.3.087; 621.43-61

Колешко В.М., Сунка В.Я., Шиманович А.В., Левый Ю.В., В.О. Грибовский В.О. Экспресс анализатор моторного топлива для автомобилей // *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 248.

Рассмотрены особенности измерения качества моторного топлива. Проведено описание известных методов контроля. Описан разработанный прибор для измерения октанового (цетанового) числа и приведены его преимущества. - Ил. 3. Библиогр. 5.

УДК 621.316

Курский В.В., Сунка В.Я., Польшкова Е.В. Программируемые ПЛИС // *Машиностроение*. - Минск, 2012. - Вып. 26. Т.2 - С. 255.

В статье изложены технологические, схемотехнические и физические аспекты построения нового класса интегральных схем - программируемых логических интегральных схем. Обоснована необходимость их использования мирового спектра технологического использования.- Ил. 2. Библиогр. 4.

УДК 539.4.015.2

Подлозный Э. Д., Гречихин Л. И. Нанотехнология производства упрочненного композита на основе кремнезема и глинозема, армированных кластерами карбоната кальция // *Машиностроение*. – Минск, 2012 – Вып. 26. Т.2 – С. 259.

В работе приведены исследования процесса формирования нанокластерных частиц, их взаимодействия в конденсированном состоянии и определены модули упругости при различных энергиях связи. Ил. 2. Табл. 2. Библиогр. 13.

УДК 004.912

Романюк Г.Э., Мардас Д.В., Журавский А.О. Программа подсчета частоты вхождения слов в тексте на белорусском и польском языках // *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 264.

Написана программа POL-BEL для подсчета количества слов в тексте на белорусском и польском языках для упрощения проведения анализа законов Ципфа для текста на указанных языках с помощью объектно-ориентированного языка программирования С. – Ил.5. Библиогр. 3.

УДК 537.311.322

Соколова К.Г., Сунка В.Я., Трафимова Е.В. - Измерение тензора проводимости анизотропных полупроводниковых материалов // *Машиностроение*. – Минск, 2012. – Вып. 26. Т.2 – С. 268.

В данной работе приведены методики измерения компонент тензора удельного электросопротивления полупроводниковых толстых и тонких (микронных) образцов. Описана оптимизация минимума погрешности измерения в зависимости от геометрических размеров измерительных зондов, а также места расположения зондов на образцах. - Ил.5. Библиогр.7.

УДК 681.586:621.316.1

Сунка В.Я. Воробьев С.А., Захаренко Е.Н., Польшкова Е.В. Беспроводная сеть передачи информации – WiMAX // *Машиностроение*. – Минск, 2012.- Вып. 26. Т.2 –С. 275.

Рассмотрены два варианта беспроводных сетей передач Wi-Fi и WiMAX . Показаны преимущества сетей WiMAX над Wi-Fi по пропускным способностям, радиусам действия и способности решать проблему последней мили. Рассмотрены вопросы внедрения WiMAX на территории республики Беларусь. – Ил. 2. Табл.2. Библиогр. 5.

ABSTRACTS

THE THEORY OF MACHINES AND MECHANISMS, TECHNIQUE OF TEACHING OF COMMON-TECHNICAL AND SPECIAL DISCIPLINES

UDC 621.83

Ausiyevich A., Reut L., Dubovskaya Ye. The analysis of wear factor of higher kinematic parts. //Mashinostroenie. – Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2. – P. 6.

The problem of wear calculation for higher kinematic parts working profiles is considered. The wear intensity depending from geometric parameters of profiles is shown. The calculation algorithm which accounts the profile changes appeared as result of wear is described.

UDC 621.01

Antsyborovich P., Ausiyevich A., Dvoryanchikova A., Nikolayev V. The features of exposition of “Theory of mechanisms and machines” courses part “Kinematics of gears”//Mashinostroenie. – Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2. – P. 9.

The gears kinematics studying features in courses “Theory of mechanisms and machines” are discussed. It’s shown how to overcome the difficulties, which caused that studying of “Theory of mechanisms and machines” forestalls the “Machines parts” courses.

UDC 621.01

Antsyborovich P. P., Akulich V. K. Estimation of friction by power rating of Mechanisms in building-up equations of Motions //Mashinostroenie. – Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2. – P. 14.

The Aspects of friction in building-up and digital solution of differentiate equations of motion by introduction in it effective moment of friction power. Corresponding Software is developed at the department “Theory of Mechanisms and Machines” of the BNTU.

UDC 621.01

Antsyborovich P. P., Dvoryanchikova A. B., Galaev K. O. Using of Information Technologies performing the Course Project on Theory of Mechanisms and //Mashinostroenie. – Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2. – P. 18.

Course Project on Theory of Mechanisms and Machines there are Methods of information Technologies usage investigated. Innovation of these methods is in harmonic combination of graphic and analytic Methods of Projects, which allow to increase the quality of Design and to avoid the increase of students work input.

UDC 621.01.752

Antsyborovich P.P., Kudin V.V. Balancing of rotation masses in the theory of mechanisms and machines. //Mashinostroenie. – Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2. – P. 22.

We consider a partition balancing of rotation parts of the course “Theory of Mechanisms and Machines”, which are the basic the theoretical position of the rotor unbalance, ways to address this imbalance, the residual (acceptable) imbalance, the ways and means to achieve this permissible imbalance.

UDC 621.01: 681.3 + 621.876

Astahov E., Garah V., Shkurko S. The comparable analysis of scissors lifts driver mechanisms schemes//Mashinostroenie. – Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2. – P. 26.

Three schemes of scissors lifts driver mechanisms are described. It’s shown, that scheme with vertical lateral displacement of driver hydrocylinder provides the lowest force for given load.

UDC 372.862

Bachantsev A.I., Grinevich E.A. feature of teaching of technical disciplines to students of economic specialities //Mashinostroenie. – Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2. – P. 30.

Lecture represents itself as a leading link of all curriculum. However traditional high school lecture has a number of lacks: lecture leads to passive perception of another's opinions; during lectures students do not listen to said words of 40 % of time; first 10 minutes the student remembers 70 % of the information, and last 10 minutes - 20 %; in 4 months students only on 10 % know discipline, than others to which lecture did not read is better; at lecture one listeners have time to comprehend, others - only mechanically to write down words of the lecturer.

However experience of training in the higher school testifies that refusal of lecture reduces scientific level of preparation trained, but should undergo certain changes which can be carried to innovative forms of giving of a material. At the heart of such forms of lectures following principles of contextual training lie: a problematical character Principle, a principle of game activity, a principle of dialogical dialogue, a principle of joint collective activity.

It is possible to carry the following to kinds of "nonconventional" lectures: Problem lecture, lecture with the planned errors (lecture - provocation), lecture - visualisation.

The analysis of use of lecture - visualisation allows to declare that the given type of giving of a material is most comprehensible to training of students of economic specialities to technical disciplines as instead of not clear terms for an audience they receive the evident image or video a material of this or that mechanism or process. Illustrations are not present, the Tab. is not present, Bibl.11.

UDC 688.1.037.97+666.271

Sukhotsky A., Dvoryanchikova A. The features of calculating of top working disk moving mechanism in pneumocentrifugal instrument are shown. //Mashinostroenie. –Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2. – P. 33.

The features of calculating of top working disk moving mechanism in pneumocentrifugal instrument are describVol. It's shown how to calculate main parameters of such mechanism.

UDC 372.862

Shahray L.I. Problem of formation of professional independence of the future engineers//Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 37.

Problems of formation of professional independence of the future engineers of machine-building branch are considerVol. Degree of a readiness of a problem of formation of professional independence of students of technical college in the pedagogical theory and practice is revealVol. - Tab. 1. Bibl.6

THE TECHNOLOGICAL EQUIPMENT AND CUTTING OF MATERIALS; ELECTROPHYSICAL AND ELECTROCHEMICAL WAYS HANDLINGS OF MATERIALS

UDC 621.9

Belyaeva G.I., Belyaev G.Y., Kochergin A.I. Effect of chemical composition and structure of the machinability of steel cutting //Mashinostroenie. – Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2. – P. 43.

The paper presents the results of the studies steel 20HN3A workability, which is often used for the manufacture of gears, stepped shafts and other critical parts. Shows the effect of heat treatment on microstructure formed in this steel. The results of the influence on the wear of the cutting tool method of cooling after heat treatment and the microstructure. Established a strong influence on the bainite wear of cutting tools and cutting speed when turning steel with the structure B + F on the workability of steel 20HN3A. - Figure 3. Bibliographies 5

UDC 37.091.3

Gordienko A. V. Determination of geometric constituent roughness for machined surface as an example of engineering task solution during learning process //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 47.

We touch the question of mathematic knowledge application by students in their special disciplines studying. We deduce the formula for geometric constituent determination of machined surface roughness when cutting by untwisted point cutting tool. – Im. 1. Bibliogr. 1.

UDC 621.91.04

Danilov V. A. Formation of many-sided surfaces on the basis of cycloidal curves//Mashinostroenie. Minsk. 2012. Vol.2. - P. 50.

Schemes of formation of cycloidal curves with reference to machining by a method of a trace of many-sided surfaces of the details, based on the message to the tool and preparation of the coordinated rotary motions are considered. The analysis of schemes of processing by heads with cutters of an external contact and covering type, influence of their geometrical and kinematic parameters on technological possibilities under the form of obtainable surfaces is given. Possibility of realization of schemes of processing on the domestic equipment is shown by the created tools. - II.5. Bibliogr.5.

UDC 621. 791

Dechko E.M., Voronovich A.V. The research of tension at the contact zones of cutting plates and the cutter housing of various mills construction //Mashinostroenie. Minsk. 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 56.

Intensification of processes of cutting at milling at the expense of application of high-speed machine tools, increase in modes of cutting, volumes of a removed allowance of metal, is-using of new tool materials and designs of tools destruction of plates, occurrence of vibrations, etc. For improvement of designs of trailer mills has revealed a number of the problems connected with increase of centrifugal forces at 3-10 time, causing easing of effort of fastening of cutting plates, cartridges with plates, decrease in vibrations the tangential arrangement of plates is offered.

In BNTU research of influence of offered constructive change of a cutting part of mills on pressure in a zone of fastening of plates is executed.

UDC 621.941

Ivashin E.Ya., Ivashin V.E. Method of processing of shovels of turbines construction //Mashinostroenie. Minsk. 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 63.

The essence of a method of processing of nonrigid details of the difficult form of type of shovels of gas turbines is stated – Bibliogr.3.

UDC 621.9

Kochergin A., Azhar A., Ratsko K. Analyses of the reasons of failure and character of damage of the combined tool for processing of apertures in case details//Mashinostroenie. – Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2. – P. 64.

Researches of character of damage and dispersion of sizes of deterioration replaceable not restored plates the modular combined tools for processing of apertures during the moment съема from the machine tool are carried out. It is established, that on sides of plates at pig-iron processing deterioration on a back surface prevails. The difference of sizes of the average deterioration replaceable not restored plates located at different steps of the combined tool that is connected with different conditions loadings the last is revealed. At processing of fixing apertures борштангами limiting the peripheral plate of 1st step is combined. The disorder of values of deterioration at the moment of tool replacement that is connected first of all with disorder of mechanical properties and qualities of a surface of a material of preparations, and also with possibility of independent replacement of the tool is revealed. As quantitative criterion of refusal of the combined tool it is offered to use size of average deterioration on a back surface. Ways are offered increase of a resource of the modular combined tool at stages design, technological and organizational-technical training manufactures. –III.6, Tab. 2, Bibl.12.

UDC 621.9

Kochergin A., Azhar A., Ratko E., Bachantsev A. Definition of criteria of replacement of the combined axial tools under production conditions //Mashinostroenie. – Minsk, 2010.– Release 26. Vol. 2. – P. 70.

During researches it is established, that the most typical kind of damage of cutting sides replaceable not restored plates combined борштанг at pig-iron processing during the moment съёма from the machine tool is deterioration on a back surface. As a result of statistical processing of results of measurements empirical distributions of limiting deterioration are found and theoretical laws of distribution with use of specially developed algorithm and the software are put them in conformity. Check of a hypothesis of the consent of the received dependences by Kolmogorov's criterion has shown, that deterioration dispersion is in the best way described by the normal law in the truncated area of investigated sizes. Thus, as quantitative criterion of refusal the tool it is possible to use size of average deterioration of the most loaded (peripheral) plate. Results of work can be used for creation of the automated expert control system by machining process by various types of cutting tools. –III.3, Tab. 1, Bibl.7.

UDC 621.9.048.4

Lugowoi I.V. Processing of apertures of small diameter with use of the modulated fluctuations of high frequency//Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 74.

In article the analysis of known methods and processing devices of apertures of small diameter is resultVol. It is shown that processes of processing of deep apertures of small diameter with curvilinear profiles represent practical and scientific interest. However they are insufficiently studiVol. In work the new method of processing in fragile materials not rotating tool about use of nonrigid intermediate elements of transfer of ultrasound is offerVol. Illustrations.3. The bibliography.: 3.

UDC 621.793

Spiridonov N.V., Kobjakov O. S, Adamenko Д.В. To a question of laser thermohardening of details of tractor technics //Mashinostroenie.– Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 76.

In article the information on use of laser thermohardening of details of agricultural machinery is resultVol. It is established that use of the laser heating used in processes of thermohardening of details, made of irons and constructional carbonaceous steels, allows to increase repeatedly wearproof properties of metals and to raise a resource of work of tractor technics.

UDC 621.762

Tumilovich M. V, Pilinevich L.P., Sheko G. A, Tarajkovich A.M.porous powder materials and devices on their basis for clearing and drying of gases at negative temperatures.//Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 78.

On its basis the porous composite threw-polymeric material and the device is developed for clearing and drying of gases at negative temperatures. A principle of work of the device - branch of a moisture at the expense of gas course through the filter from the Porous powder materials, placed in the liquid absorbent, which temperature of freezing more low a minus 60 °C and which has ability of absorption of a moisture from gas. The second filter provides condensation of steams of absorbent on its surface and, at formation of drops of a liquid, their branch from gas and return back in the chamber with liquid absorbent. The developed device can be applied in control systems of spherical cranes to clearing and drying of pulse gas of devices of automatics at compressor stations and gas pipelines, and also for maintenance of works of pneumatic systems of motor transport at negative temperatures. - II.3. Bibliogr.9.

UDC 621.9.011:517.962.1

Turomsha V. I, Dovnar S.S., Tumi El-Mabruk Abuzhafer Ali. An estimation of rigidity of legs of a table of the is direct-milling machine tool a finite element method//Machine industry. - Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 81.

Is final-element simulation of elastic strains in legs of a table of the is direct-milling machine tool is spent. Screw legs of the cylindrical and prismatic shape are examined. It is displayed that the most compliant element of a leg is carving connection. It is clarified that the concrete foundation under a leg is

rigid enough and answers approximately form of elastic strains. It is determined that shift rigidity of legs is insignificant in relation to rigidity on compression. It is detected jointly effect in behavior of well-greased thread, in addition sharply reducing shift rigidity. Constructive and technological recommendations about heightening of rigidity of legs of a table are made. - Silt. 3. The bibliography 3.

UDK 621.95.01

E. Feldshtein. Drilling of reach-through holes in molybdenum by drills with antiwear coatings//Mashinostroenie.– Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 87.

The influence of feed and coat type on burr forming, chip shapes, wear character and holes accuracy when drilling of through holes in molybdenum is considered. Coats BALINIT@FUTURA NANO (material TiAlN with nanostructure), BALINIT@HARDLUBE (material TiAlN + WC/C, multilayer) и BALINIT@X-TREME (material TiAlN, monolayer) were researched. When molybdenum machining burrs have shape of shot fragments placed around holes. Highest burrs were registered when using of X-TREME coat. Chips have shape of shot cone spirals when drilling molybdenum; this is typical for short metal cutting. Chip shapes are not depending practically on feed and coat composition. Using of coats generally increase chip thickness compression ratio, sometimes more than two time. Wear of uncoated drills is fare more than wear of coat drills. The tolerance of drill holes generally is found within 10-11 class of accuracy, but „X- TREME ”coat ensures far highest accuracy. - Fig. 7. Tab. 2. - Bibliogr. 1.

UDK 621.941

E. Feldshtein, H. Pacha-Golenbiowska. The influence of tool material on geometrical structure and microhardness of machined surface when turning of antifriction cast iron//Mashinostroenie.– Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 91.

The influence of tool material and cutting parameters on machined surface roughness, its topography and microhardness of surface layer when turning of antifriction cast iron EN-GJS2131 with ferrite-perlite microstructure. The best results plates from cubic nitride boron CBN 7050 ensure, and worst-case – plates from hard alloy K10. - Fig. 6. Tab. 1. - Bibliogr. 2.

UDC 621.793.1

Frolov I.S., Ivashchenko S.A., Mrochek ZH.A. Designing composite vacuum-plasma coatings for specific operating conditions //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 95.

The question of development of vacuum-plasma coatings for special conditions is considered. Constructions of multilayer composite coatings possess the necessary mechanical and operational characteristics are proposed. The features of formation and methods for multilayer banded and step-banded coatings are described. – Ill. 4. Bibliogr. 5

UDK 621.91.

Chartaryiski A.V., Shagun V.I., Rutsky Y.S., Altunin S.V., Dushutin A.V.. Introduction of high-speed milling on manufacture «BelAZ»//Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 100.

Results of comparative tests of face mills with replaceable неперетачиваемыми plates firms "Kennametal" (USA-Germany) with application of high-speed milling and firms "Pramet" (Czechia) on the machine tool «Tos Varnsdorf» (Czechia), model WHN 110/MC are stated. A processed detail: «a cover of gear wheels of a drive» made of pig-iron gray cast iron 20 GOST 1412-85 with Brinell hardness (HB) 217 ... 241. - Ill.5. Reference.5. Tab. 2.

UDC 629.11.011.5

Alexandrov A.A., Pronkevich A.S., Kurilenko V.V. Deflected mode calculation of a dump truck frame with the help of ANSYS. //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 104.

The present article contains the usage of modern CAD/CAE programs during construction and calculation of a heavy payload dump truck frame.

UDC 539.3

Vasilevich Y.B., Neumerzhickaia E.Y., Gaiuza I.M. The calculation methodology for thermoelastic condition of anisotropic plate, which is weaken by elliptic hole. //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 106.

There is given calculation methodology for intense-deformed condition of orthotropic plate with elliptic hole.

UDC 539.4

Vasilevich J.V.; Ostrikov O.M. Teorija of not homogeneous toughness of deformable amorphous hard bodies//Machine industry. - Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 111.

The theory of not homogeneous plastic deformation of hard bodies is developed quasidislocation. On the basis of the theory calculation of fields of voltages at a shift strip is carried out. - silt. 5.

UDC 539

J. Dikan, L. Larchenkov Composite patterns mechanics //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 116.

Some Vol.s of composite patterns structure and mechanics, types of composite patterns and its' application, double metallic systems' structure are dealt with. - Pic. 2. Table 2. Bibliography 11.

UDC 621.1; 621.7.

Zubko S.A. Flaw Growth in top at trial of the steel sample on rupture.//Mashinostroenie. – Minsk, 2012 – Release 26. Vol. 2. – P. 121.

Process of growth of a flaw in its top is considered at trial of the steel sample on rupture. At the application of the stretching loading directed on increase of disclosing of a flaw, in the course of tension heightening there is an accumulation of a deformation field around flaw top. The deformation field collects in the form of stratified language in a direction of growth of top of a flaw, and at reaching of certain length the moment of rupture of a material in a zone of the saved up deformation field with the subsequent lowering of a tension of a material and increase in length of top of a flaw at a deformation field zone occurs. The further heightening of explosive effort leads to the subsequent accumulation of strains, shaping of a new "language" deformation zone, its break and the further growth of a flaw. Flaw growth occurs in steps, races. - II.1. Библиогр.5.

UDC 621.039.5.001.24+539.4:620.2+519.621.64

Klus S.A., Shyrvel P.I., Glembotsky A.V. The investigation of a stress state of the nuclear reactor fuel assembly's cover Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 124.

The thin protective prismatic shell in the conditions of an irradiation and thermo power influence is considered in this article. The basic equations for describing behavior of the prismatic shell under acting of irregular heating and nuclear radiation have been received. The mathematical and mechanical models for describe steady state of the prismatic shell of the NPP's fuel element are proposed. The constitutive differential equations have been developed. The numerical algorithm for finding of the basic characteristics of stress/strain state has been proposed. Graphic distribution of deflections and stresses of a prismatic shell have been received. The comparative analysis of received results in program complex FEM ANSYS is carried out. Fig.: 16. Ref.: 5 titles.

UDC 621.81:539.4

Kurilenko V.V., Pronkevich A.S., Alexandrov A.A. Analysis of the mode of deformation of an epicyclic gear. //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 131.

The article contains information about usage of modern CAD/CAE systems for design and analysis of reduction units of high load-carrying ability dump trucks.

UDK 538.911

Neumerzhitskaya E.YU. The morphology of the surface of the fast-hardened aluminum foils and its alloys with the transition elements //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 134.

The morphology of the surface of the fast-hardened aluminum foils and its alloys with the transition metals was examined. The temperature distribution along the thickness of the plate was investigated. - Illus. 2. Literature 8.

UDC 531.66

Pronkevich S.A., Kartashevich E. L., Starovoytova O.L. Using the finite-element program LS-DYNA for impact modeling. //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 138.

The present article contains the facilities of problem solution with the help of LS-DYNA and the solution of three test problems of elastic objects impact is given.

UDC 62-756.6

Pronkevich A.S., Truhnov A.L. Use of is final-element package LS-DYNA for the analysis of passive safety of the car.//Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 142.

On an example of calculation of face-to-face collision of car Chevrolet C2500 Pickup with the concrete block, we considered possibility of the using program LS-DYNA for crash-test modelling. Ill. 7. Bibl. 4.

UDC 621.793

Sokorov I.O., Spiridonov N.V., Volodko A.S., Piletskaja L.I. Research of effect of endurance on longevity heavy the shafts, strengthened gas thermal a spraying //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 146.

In a paper the technique of definition of longevity of details tribounit the matings, strengthened gas thermal to a spraying, taking into account conditions of their chafing is explained. - Il.2, Bibliogr. 15.

UDC 539.3+612.311

Sklyar O.N, Bosiakov S.M, Dosta A.N, Kazakevich V.A. Definition of the internal forces, arising in basic fangs of dental bridge //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. –P. 150.

In paper expressions for reactions and the reaction moments arising in fangs, being support dental bridge are obtained, at action on an bridge of the concentrated loading. Numerical results are presented in the form of dependences of reactions and the reaction moments on coordinates of a point of application of force and a angle of an inclination of force to a certain axis of coordinates for a canine and premolar.

UDC 001.57: 681.7.027.72, 666.1.053.525

Chigarev A.V., Kovenya T.A., Pokulnitschy A.R., Soloshenko D.S. Processes of designing and manufacturing of optical components //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. –P. 156.

Simulated processing algorithm of the optical components with finely divided abrasives. A special feature is that the tool performs removal of material in one pass only at certain sites, selected for maximum condition and subject to certain restrictions. The model of forming the surface and the process of treatment are based on the use of package Mathematica– Il.4 Bibliogr.8.

UDC 621.81:539.4

Chigarev A.V., Ruchan M.V., Shukevich T.V. Calculation of thick-walled cylinders //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 160.

The calculation of active and working stress of pipe under the action of internal pressure was fulfilled by analytical method and with help of ANSYS. — Ил.5.

UDC 621.039.5.001.24+539.4:620.2+519.621.64

Shyrvel P.I., Klus S.A., Levchuk A.V. The influence of mechanical loading on stress/strain state of the thin cylindrical shell undergoing NPP's reactor action //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Vol.2. – P. 164.

This paper considers the problems of modern methods for calculating designs and materials in the nuclear industry. The cylindrical shell in the conditions of an irradiation and thermo power influence is considered in this article. The aim of the paper is to produce a model of solve stress/strain state for fuel rod's cladding. Mechanical model for describing steady stress/strain state of the nuclear reactor's cylindrical cladding are proposed. The computer program of decision of the thermo radiating quasistatic task in package Mathematica 5.0 has been programmed. A graphic distribution of deflections and stresses of a shell have been received. Also the paper contains a simulation concerning a fuel element section with a subsequent solution for the temperature and thermo elastic problem in computer complex FEA ANSYS. All the obtained results have passed through checking procedures. Fig.: 15. Ref.: 4 titles.

UDC 539.3

Jaznevich A.M. Influence of corrosion on durability of steel armature //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 172.

The reasons of origin of corrosion of armature in ferro-concrete constructions are considered. Classification of corrosion destructions, aspects of flaws in concrete is reduced. The factors influencing lowering of properties of durability of rods for armature are described. - silt. 5. Tab. 1. Bibliogr. 4.

INTELLECTUAL AND SENSORY SYSTEMS IN MACHINE INDUSTRY; NANO-MATERIALS, NANO-TECHNIQUES, NANO-SYSTEMS

UDC 681.586

Barkaline V.V., Ivkina O.M. Simulation of biosensor's microfluidic element with ANSYS CFX package//Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 180.

The characteristic features of the ANSYS CFX simulation of microfluidic elements of integral biosensors are discussed. The pressure and fluid velocity on the channel input are shown to be possible control parameters of the biosensor. – Figs. 6. Refs. 2.

UDC 681.586: 534.2, 541.16

Barkaline V.V., Pletezhov A.A. Simulation of IR-spectra of the array of carbon nanotubes with NAMD package//Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 184.

The possibility of the spectral method of the control of geometric parameters of carbon nanotube arrays is discussed. On the basis of molecular dynamics simulation with NAMD package the absorption spectra of electromagnetic waves in frequency range 0 – 500 cm⁻¹ in arrays with various number of nanotubes and various intertube distances were obtained. Spectral line near 25 cm⁻¹ was determined as the most promising for control purpose because of high correlation of its characteristics with the array geometrical properties. – Figs. 3. Refs. 4.

UDC 621.7.044.2

M.V.Zagirnjak, V.V.Dragobetsky, D.L.Pirogov, A.D.Konvalenko, A.B.Markevich. Modular explosion-blow installation for reception Nano-dusts, Nano-coverage and Nano-doping //Mechanical

engineering. – Minsk. 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 188.

The modular design multi-chamber explosion-blow the container for the combined multiphase crushing hard metal a breakage from a waste of machine-building manufacture for the purpose of their double use in tool manufacture is presentVol. It is expedient to use for creation маломерных взрывоударных containers which can be used on operating manufactures.

UDC 621.039.5.001.24+539.4:620.2+519.621.64

Klus S.A., Pokulnitskii A.R., Shyrvel P.I. The modeling of interaction for fuel pin and cladding by means FEA in program complex ANSYS //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 193.

This paper considers the problems of modern methods for calculating designs and materials in the nuclear industry. The aim of the paper is to produce a model of solve stress/strain state for the fuel rod. The models for describe stress/strain state of an active zone of the NPP's fuel rods are proposVol. The finite element method of the numerical analysis of the steady deformed state of the fuel rods under nuclear reactor operating is offerVol. This paper contains a simulation concerning a fuel rod section with a subsequent solution for the temperature and thermo elastic problem in computer complex FEA ANSYS. All the obtained results have passed through checking procedures. Fig. 7. Table 2. Ref.: 7 titles.

UDC 612.821:502.12

Koleshko V.M., Varabei Y.A., Khmurovich N.A. Intelligent mobile systems for control of human cognitive consciousness //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 199.

Influence characteristic features of electromagnetic field mobile phones on fluid bioinformation mediums and human brain waves are examined, functional changes results of an organism biosystem using a mobile phone are analyzVol. The development of a mobile intelligent system is described for noncontact recording and remote transferring of the brain activity and control methods of human cognitive consciousness for improving its creative abilities and providing personal safety. 2 tables, 4 figures, 14 references.

UDC 004.891.3

Koleshko V.M., Hajynski T.T., Chashynski A.S. Methods of analysis and prognostication of the object state based on changes of its parameters //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 209.

Here are described methods for analysis of the object: collection of information and prognostication of the object's state. Comparisons of different models that can be used for working with object are presentVol. 1 table, 1 figure, 1 reference.

UDC 612.821.8:331.46:331.47

Koleshko V.M., Gulay A.V., Varabei E.A., Hajynski T.T., Kukenau A.S., Mardas D.V., Chashynski A.S. Intelligent system of information pattern recognition //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 212.

Features of acquisition and analysis of multidimensional sensory patterns are considerVol. Intelligent hardware-software "WIS" is developed for information pattern recognition. Fig. 2. Bibl. 9.

UDC 621.3.082.4

Koleshko V. M., Gulay A. V., Gulay V. A. Surface effects self-organization with electron treatment: acoustic sensor control //Mashinostroenie. — Minsk., 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 217.

The control way for self-organization processes in electronic treatment area by acoustic oscillations spectrum was developVol. The conditions of noise-form acoustic oscillations receiving by flat piezoelectric sensor are investigatVol. The characteristics control of wideband oscillations in specimen at electron beam treatment are carried out. The correlation between acoustic oscillations amplitude and surface relief of electron exposure area are revealVol. — III. 4.

UDC 621.3.084.2.017

Koleshko V. M., Gulay A. V., Lyskovskiy V. V., Gulay V. A., Krupskaya E. V., Levchenko N. V. *The rare earth oxides based sensor materials: simulation of electronic properties //Mashinostroenie—Minsk, 2012. — Release 26. Vol. 2. — P. 222.*

The simulation of atomic-structure and electronic properties of rare earth oxides as sensor nanosystems active materials was carried out. Electronic density are investigated and energy band structure are calculated for samarium and holmium oxides. The charge carriers spin polarization near Fermi level are determined, it amount for samarium oxide is 48.72%, for example. — Il. 4. Tab. 1. Bib. 4.

UDC 631.5/9:004

Koleshko V. M., Gulay A. V., Polinkova E. V., Gulay V. A. *Sensor intelligent system in engineering for precision agriculture technology //Mashinostroenie. — Minsk, 2012. — Release 26. Vol. 2. — P. 227.*

The sensor intelligent system for precision agriculture was developVol. It based on soil light-color monitoring and quality characteristics detection. The dependences of surface attenuation coefficients versus optical radiation wavelength are definVol. — III. 2.

UDC 656

Koleshko V.M., Rizhenkov O.E. *Intelligent system of road signs recognition. // Mashinostroenie. — Minsk, 2012. — Release 26. Vol. 2. — P. 229.*

The object of development is system of road signs recognition from moving vehicle.

During the design work the following developments were made: road signs recognition module the operation principle of which is based on identifying road signs on image by color and geometric characteristic; and module comparing signs icons with samples. — Pic.3. Lit.6.

UDC 681.586

Koleshko L.A., Sunka V.Ya. *Piezoelectric wide band micro-nanoactuators //Mashinostroenie. — Minsk, 2012. — Release 26. Vol. 2. — P. 233.*

A calculation features and parameters stability of New class of wide band piezoelectric converters for wide range using actuators was reviewed in this paper. Perspektivity of using wide band piezoactuators is shown. — Im. 5. Bibliogr. 9.

UDC 681.532, 586; 621.316, 398;004.912

Koleshko V.M., Sunka V.Ya., Varabei Y.A., Mardas D.V., Sunka Y.V., Romanovich A.A., Hramenkov D.V. *Microcondition intelligent sensor system for measuring the temperature //Mashinostroenie. — Minsk, 2012. — Release 26. Vol. 2. — P. 239.*

The intelligent sensor system for measuring the temperature using the frequency method with the transmission of information over a wireless transmission information network (WTIN) (up to 10 kilometers) is developVol. The program for PIC16F84A microcontroller to control the process of measurement and to process the measured data. The specialized output code with identifying (TEDC) transmission of information over WTIN . - Il. 4. Bibliogr. 5

UDC 681. 586

Koleshko V.M., Sunka V. Ya., Kutouski V.D. *Particular programming microcontrollers for intelligent systems //Mashinostroenie. — Minsk, 2012. — Release 26. Vol. 2. — P. 244.*

The technical parameters and features of programming microcontrollers world's major producers for intelligent systems a wide range of purposes. — Im. 2. Bibliogr. 7.

UDC 621.317.353.3; 620.171; 621.3.087; 621.43-61

Koleshko V.M., **Sunka V.Ya.**, Shimanovich, A.V., Levyj Ju.V., Gribovskij V.O. *The express analyser of motor fuel for cars //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 248.*

Considered Features of measurement of quality of motor fuel. Spends the description of a known inspection methods. Described the developed device for measurement octane (cetane) value and its advantages are resultVol. - Im. 3. Bibliogr. 5.

UDK 621.316

Kurskiy V.V., **Sunka V.Ya.**, Polynkova E.V. *Program velveteen //Mashinostroenie. – Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 255.*

In article are stated technological, circuit and physical aspects of construction of a new class of integrated schemes - programmed logic integrated schemes. Necessity of their use of a world spectrum of technological use is provVol.- Im. 2. Bibliogr. 4.

UDC 539.4.015.2

Podlozny E. D., Grechihin L. I. *Nanotechnology of process strengthening composite based on silica and alumina by clusters of calcium carbonate are reinforced //Mashinostroenie.–Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2.– P. 259.*

This work contains result of research of the process of forming nanocluster particles, their interaction in condensed state and modulus of elasticity for various energy contact are determinVol. III. 2. Tables 2. Bibl. 13.

UDC 004.912

Romaniuk G.E., Mardas D.V., Zhuravskii A.O. *The program counts the frequency occurrences of words in the text of the Belarusian language and polskrm //Mashinostroenie. – Minsk., 2012. – Release 26. Vol. 2. –P. 264.*

The program POL-BEL for counting the number of words in the text in Belarusian and Polish languages to simplify the analysis of laws Zipf for text in these languages using object-oriented programming language C#. –Il. 5. Bibliogr. 3.

UDC 537.311.322

Sakalova K. R., **Sunka V.Ya.**, Trafimava K.V. - *Measurement tensor conductivity of anisotropic semi-conductor materials //Mashinostroenie.– Minsk, 2012. – Release 26. Vol. 2. – P. 268.*

In the given job techniques of measurement a component of tensor specific resistivity of semiconductor thick and thin (micron) samples are resultVol. Optimisation of a minimum of an error of measurement depending on the geometrical sizes of measuring probes, and also the locations of probes on samples is describVol. – Im. 5. Bibliogr. 7.

UDK 681.586:621.316.1

Sunka V. Ya., Vorobyou S.A., Zakharenko E. N., Polynkova E.V. *Wireless network of an information transfer – WIMAX //Mashinostroenie. – Minsk, 2012.– Release 26. Vol. 2.– P. 275.*

Two variants of wireless networks of transfers Wi-Fi and WiMAX are considerVol. Advantages of networks WiMAX over Wi-Fi on throughputs, radiuses of action and ability to solve a problem of last mile are shown. Questions of introduction WiMAX in republic Belarus territory are considerVol. - Silt. 2. Tab. 2.Bibliogr. 5.

Научное издание

МАШИНОСТРОЕНИЕ

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ «МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ
ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

06–09 апреля 2010 года

Выпуск 26

В 2 томах

Том 2

Ответственный за выпуск А.И. Бачанцев
Компьютерная верстка и дизайн обложки ВЦ МСФ

Подписано в печать 20.06.2012. Формат 60×84 ¹/₈. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 35,22. Уч.-изд. л. 13,77. Тираж 80. Заказ 94.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.