

Министерство образования и науки Российской Федерации
Российский фонд фундаментальных исследований
**ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю. А.»**
Министерство промышленности и энергетики Саратовской области
Институт проблем точной механики и управления РАН
Саратовский научный центр РАН
ФГУП «Базальт» корпорации РОСАТОМ, г. Саратов
ОАО НПП «Контакт»
ОАО «КБ Электроприбор»
ОАО «Завод автономных источников тока»
ФГУП «НПЦАП им. академика Н. А. Пилюгина» – ПО «Корпус»
ООО «Неофлекс»
ОАО «СЭПО»
ОАО «Саратовский агрегатный завод»
НПП «Нитрид»
ООО «Маяктрансэнерго», г. Пенза
ОАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти
ФГУП ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко», г. Заречный
НПЦ «Электронные системы»
ОАО «Алмаз»
НПК ПО «Тантал»
ОАО ЭОКБ «Сигнал» им. А. И. Глухарёва

ИНЖИНИРИНГ ТЕХНО 2014

**СБОРНИК ТРУДОВ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
30 июня-1 июля 2014 г.**

Том 2

Саратов 2014

УДК 621.9,629.1
ББК 34
И 62

Редакционная коллегия:

Доктор технических наук, профессор Бекренев Н.В. (общая редакция), доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке Института проблем точной механики и управления РАН (ИПТМУ РАН) Панкратов В. М., действительный член Академии навигации и управления движением Российской Федерации, действительный член Академии космонавтики имени К.Э. Циолковского, доктор технических наук, профессор Большаков А.А., доктор технических наук, профессор Боровских В.Е., доктор технических наук, профессор Игнатьев А.А., доктор технических наук, профессор Захаров О.В., кандидат технических наук, доцент Боровских У.В.

И 62 ИНЖИНИРИНГ ТЕХНО 2014: сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. / под ред. Н.В. Бекренева и У.В. Боровских. Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2014. – Т. 2. – 246 с.
ISBN 978-5-4426-0033-9

В сборнике публикуются избранные труды участников II Международной научно-практической конференции «ИНЖИНИРИНГ ТЕХНО 2014», состоявшейся в июне-июле 2014 г. в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А.

Представленные материалы отражают современные тенденции развития технологии машиностроения, методов создания материалов с заданными свойствами, применения электрофизических и комбинированных процессов резания высокопрочных материалов; использования высокоэнергетических методов воздействия на различные материалы, включая технологии двойного назначения, математического и компьютерного моделирования многофакторных процессов в машино- и приборостроении, разработки специального программного обеспечения для управления сложными техническими комплексами, автоматизации решения вычислительных задач в области машино- и приборостроения.

Сборник ориентирован на специалистов, занимающихся разработкой перспективных материалов и покрытий, технологических процессов механической, электрофизической и комбинированной обработки, информационных технологий в машино- и приборостроении, технологий измерительно-управляющих систем.

Тезисы и доклады рецензированы и отрецензированы Программным комитетом конференции. Сборник издан при финансовой поддержке РФФИ (грант РФФИ № 14-08-06045)

УДК 621.9,629.1
ББК 34

© Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю. А., 2014
© Коллектив авторов, 2014

ISBN 978-5-4426-0033-9

Секция 4

Приборостроение, элементы и устройства информационно- измерительных и управляющих систем

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОВЕРКИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Д.М. Голев¹, М.М. Савочкина²

ПГУ, г.Пенза, Россия

¹Тел. 89624743110, E-mail: golevdm@gmail.com

² Тел. 89374150391, E-mail: marisavochkina@mail.ru

Широкое внедрение волоконно-оптических датчиков (ВОД) в ракетно-космической и авиационной технике требует применения современных технологий их изготовления, снижающих их себестоимость, повышающих технологичность. Наиболее сложными технологическими этапами являются процедуры юстировки и регулировки оптической системы ВОД. Необходима минимизация затрат на данные процедуры, особенно в тех случаях, когда они тесно связаны с преобразованиями в механической преобразующей системе датчиков. В связи с этим создание экспериментальной установки для определения конструктивно-технологических параметров механической преобразующей системы, значительно снижающей затраты на проектирование и разработку волоконно-оптических датчиков, является актуальным.

Ключевые слова: измерительная установка, волоконно-оптический датчик, давление, механическая преобразующая система, мембрана, аттенюатор, экспериментальная проверка.

MEASURING UNIT FOR MECHANICAL CONVERTING SYSTEM CALIBRATION OF FIBER-OPTIC PRESSURE SENSOR

D.M. Golev, M.M. Savochkina

Penza State University, Penza, Russia

Wide implementation of fiber-optic sensors (FOS) in aerospace and aeronautical equipment calls for contemporary technologies, which lower the prime cost and improve machinability. Most complicated development stages are alignment and adjustment of FOS's optical system. It is essential for minimize expenses at that stages. In this context we must develop measuring unit for experimental verification of engineering specifications of mechanical converting system. Appliance of this unit in design phase can greatly reduce material and time expenses for testing and alignment of fiber-optic sensor in comparison with known methods of finalization engineering specifications of FOPS.

Keywords: measuring unit, fiber-optic sensor, pressure, mechanical converting system, attenuator, membrane, experimental check.

Методы проведенных исследований. Использовались основные положения теоретической и прикладной механики, волоконной оптики, аналитической геометрии, теорий чувствительности, измерений, статических предельных метрологических моделей линейных измерительных преобразователей, математического моделирования ЭВМ. Достоверность полученных теоретических результатов и выводов подтверждалась экспериментальными исследованиями реальных макетов механической преобразующей системы дифференциальных волоконно-оптических датчиков давления (ВОДД).

Новизна технических решений. Впервые предложена установка для предварительной проверки результатов математического моделирования конструктивно-технологических параметров ВОДД, использование которой на этапе проектирования снижает материальные и временные затраты на процедуры юстировки и настройки датчиков на порядок в сравнении с известными методиками доводки конструктивно-технологических параметров в процессе изготовления ВОДД.

1. Априорные сведения о дифференциальном волоконно-оптическом датчике давления аттенюаторного типа по патенту РФ № 2290605[1]

На рис. 1 приведена упрощенная конструктивная схема волоконно-оптического датчика избыточного давления аттенуаторного типа, который является прототипом разрабатываемого дифференциального ВОДД с предельным аттенуатором.

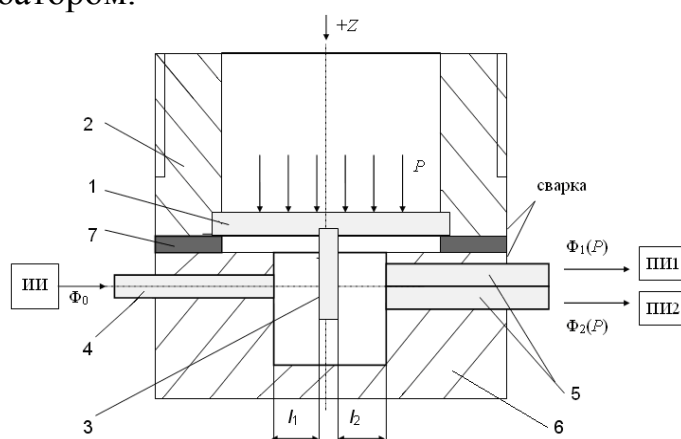


Рис. 1. Упрощенная конструктивная схема одного из вариантов дифференциального ВОДД с предельным аттенуатором

Мембрана 1 жестко соединена со штуцером 2 (например, с помощью сварки) или является его частью. В центре мембраны жестко закреплен (например, с помощью сварки) дифференциальный предельный

аттенюатор 3 (шторка) с круглым отверстием на расстояниях l_1 и l_2 относительно излучающего торца подводящего оптического волокна ПОВ 4 и приемных торцов отводящих оптических волокон ООВ 5 первого и второго измерительных каналов соответственно. ПОВ 4 и ООВ 5 жестко закреплены в корпусе 6. Юстировка волокон относительно отверстия в аттенюаторе 3 осуществляется с помощью металлической прокладки 7, толщина которой подбирается в процессе настройки датчика.

Измеряемое давление воспринимается мембраной 1, при этом аттенюатор 3 смещается относительно подводящих и отводящих волокон, что ведет к изменению интенсивности световых потоков, поступивших в отводящие оптические волокна. Таким образом, преобразователем измерительной информации является дифференциальный волоконно-оптический преобразователь микроперемещений (ВОПМП).

На рис. 2 приведена расчетно-конструктивная схема дифференциального ВОПМП с предельным аттенюатором, являющегося базовым элементом ВОДД.

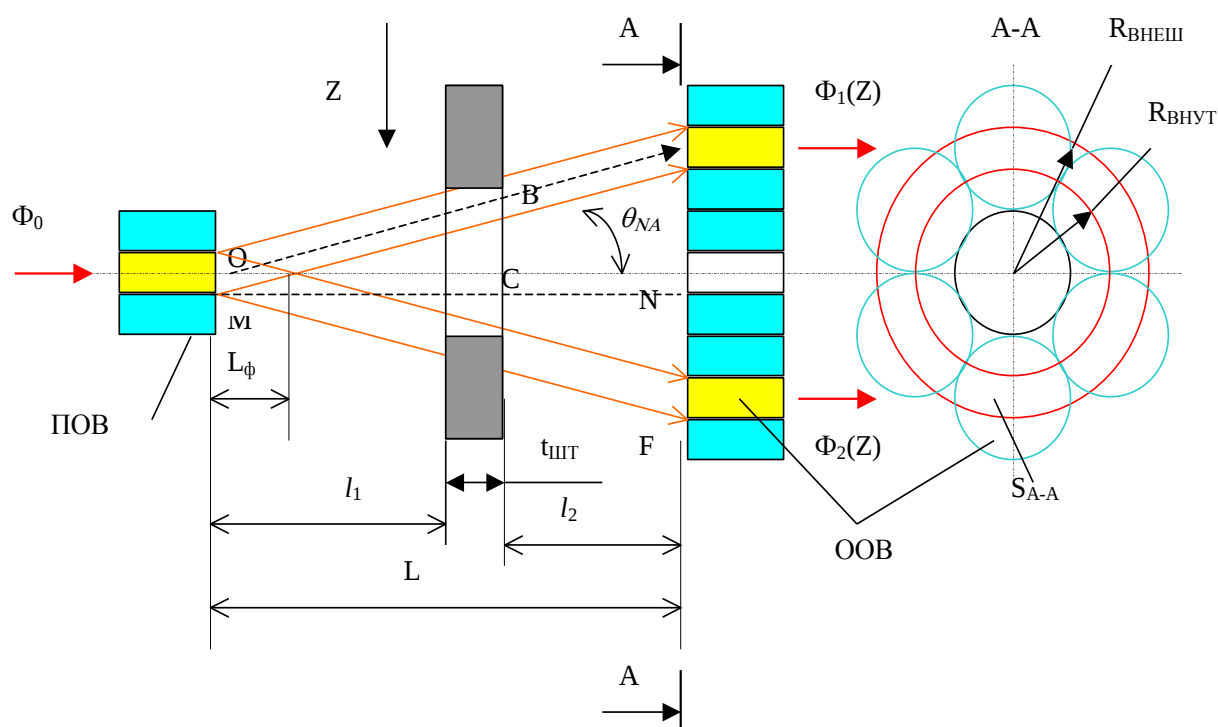


Рис. 2. Упрощенная расчетно-конструктивная схема дифференциального ВОПМП с предельным аттенюатором с круглым отверстием

ВОПМП содержит аттенюатор 1 толщиной t с круглым отверстием, расположенный на расстоянии l_1 относительно излучающего торца подводящего оптического волокна ПОВ, и отводящие оптические волокна

ООВ первого и второго измерительных каналов, расположенные на расстоянии L от ПОВ.

ВОПМП работает следующим образом (см. рис. 1 и 2).

От источника излучения ИИ по подводящему оптическому волокну ПОВ 4 световой поток Φ_0 направляется в сторону аттенюатора 3. Под действием измеряемой физической величины (давления) аттенюатор перемещается на величину Z относительно торцов отводящих оптических волокон ООВ 5, что ведет к изменению интенсивности световых потоков $\Phi_1(Z)$ и $\Phi_2(Z)$, поступающих по отводящим оптическим волокнам на светочувствительные площадки приемников излучения (фотодиодов) ПИ1 и ПИ2 первого и второго измерительных каналов соответственно. Приемники излучения преобразуют оптические сигналы в электрические I_1 и I_2 , поступающие на вход блока преобразования информации (БПИ).

2. Разработка измерительной установки для проверки достоверности результатов математического моделирования механической преобразующей системы волоконно-оптического датчика разности давления (ВОДРД)

Для снижения себестоимости и упрощения этапа разработки была предложена установка, имитирующая воздействие разности давления на механическую преобразующую систему ВОДРД (рис. 3).

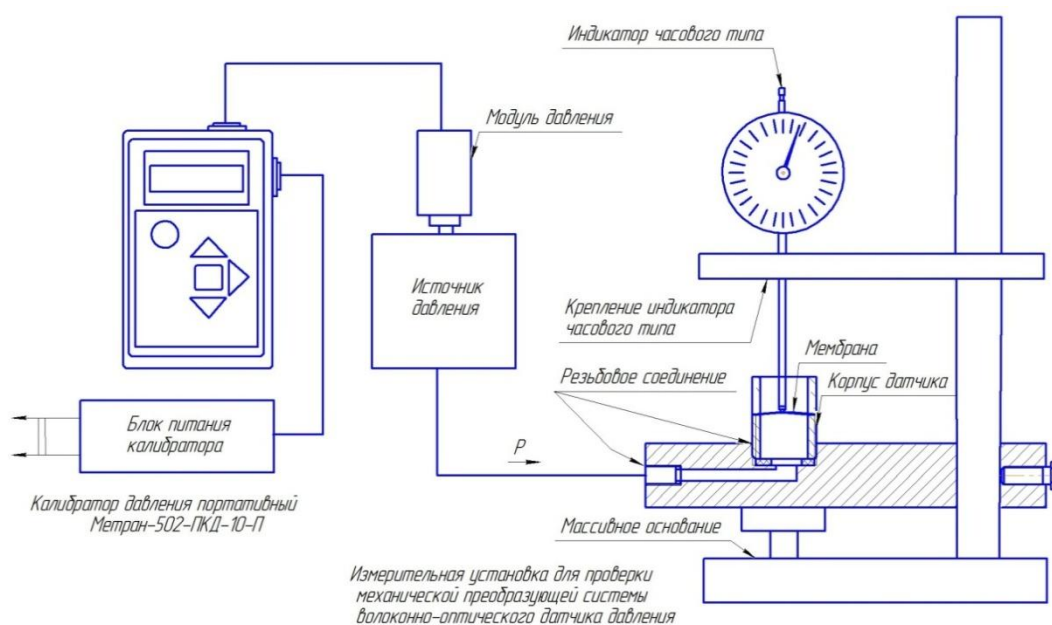


Рис. 3. Измерительная установка для проверки механической преобразующей системы волоконно-оптического датчика разности давления

Измерительная установка для снятия экспериментальных зависимостей $W=f(P)$ состоит из поверочного калибратора давления, стойки, установленной на массивном основании, индикатора часового типа

(ИЧТ), исследуемого ВОДРД. На стойке неподвижно закреплены приспособления для установки ИЧТ и исследуемого ВОДРД.

Для калибровки используется поверочный калибратор давления Метран-ПКД-10 ТУ 4212-002-36897690-98, включающий: электронный блок индикации (ЭБИ), внешний модуль давления, источник создания давления (помпа ручная пневматическая), кабель электрический для подключения к сети и кабель пневматический для подачи измеряемой среды, давление которой измеряется (рис. 4).



Рис. 4. Поверочный калибратор давления Метран-502-ПКД-10П

Портативный калибратор давления Метран-502-ПКД-10П предназначен для точного измерения и воспроизведения избыточного давления и разрежения в диапазоне 0...25000 кПа с погрешностью не более 0,1%. Применяется в качестве эталона при поверке и калибровке – поверки средств измерений давления: датчиков давления, разности давлений по ГОСТ 22520 (например, датчиков серий Метран, Сапфир), показывающих и самопишущих манометров и других аналогичных приборов и устройств и в качестве цифрового манометра при мониторинге процессов измерения давления.

В состав калибратора давления входит ручной пневматический насос Н2,5М, предназначенный для создания избыточного давления в образцовом и поверяемом средстве измерений давления. Диапазон задания давления: от 0 до 2,5 МПа.

В установке используется индикатор часового типа с погрешностью не более 0,5 мкм. Измерительный шток ИЧТ в нейтральном положении

(0 на шкале) контактирует с верхней мембраной (мембраной минусовой камеры). Мембрана нижней (плюсовой) камеры расположена со стороны основания для крепления датчика.

Калибратор соединен с датчиком с помощью пневматического кабеля через резьбовое соединение в основании для крепления датчика.

В процессе экспериментальных исследований используется имитационная модель датчика без волоконно-оптического тракта (то есть отсутствуют оптические волокна), включающего только механическую преобразующую систему, параметры которой соответствуют расчетным. Такое техническое решение снижает стоимость разработки.

3. Методика выполнения исследований по определению экспериментальных зависимостей $W=f(P)$

Максимальное перемещение центра мембраны $W_{\max}$ и максимальные напряжения $\sigma_{\max}$, возникающие в материале мембраны под действием давления P , определяются по следующим известным формулам [2]:

$$W_{\max} = \frac{3(1-\mu^2)R_m^2 P}{16Eh^3}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{3r^4 P}{4h^2} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где $W_{\max}$ – максимальный прогиб мембраны под действием давления, мкм;

R_m, h – радиус и толщина мембраны, мм;

E – модуль упругости материала мембраны, Н/мм², для сплава 36НХТЮ:

$$E = 195000 \text{ Н/мм}^2 = 1988,4 \text{ кгс/мм}^2;$$

μ – коэффициент Пуассона материала мембраны; для сплава 36НХТЮ: $\mu=0,3$;

σ – допустимое максимальное напряжение, Н/мм²;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение справочное, Н/мм², для сплава 36НХТЮ:

$$[\sigma] = 1200 \text{ Н/мм}^2 = 122,3 \text{ кгс/мм}^2.$$

На основании расчета строится расчетная зависимость $W_{\text{расч}}=f(P)$.

Первоначально проводится калибровка измерительной установки с помощью образцового манометра в соответствии с инструкцией по эксплуатации на поверочный калибратор давления Метран-ПКД-10 ТУ 4212-002-36897690-98.

Затем образцовый манометр отсоединяется, и к калибратору подключается разрабатываемый ВОДРД. С помощью калибратора воспроизводится давление P в заданном диапазоне измерения (например 0,1...25 кгс/см² с шагом 1 кгс/см²), которое по пневматическому кабелю передается на мембрану плюсовой камеры, соединенную с помощью

штока с мембраной минусовой камеры. Прогиб W центра этой мембраны с помощью ИЧТ измеряется. По результатам измерений строится экспериментальная зависимость $W_{\text{эксп}}=f(P)$, которая сравнивается с расчетной зависимостью $W_{\text{расч}}=f(P)$.

При степени совпадения результатов расчета и эксперимента до 90% расчетные параметры механической преобразующей системы принимаются окончательно и закладываются в конструкцию ВОДРД. В противном случае необходимо уточнить параметры механической преобразующей системы и повторить эксперимент.

Выводы

Разработана измерительная установка для экспериментальной проверки механической преобразующей системы волоконно-оптического датчика разности давления.

Даны рекомендации по конструктивному исполнению дифференциального волоконно-оптического датчика разности давления.

Использование имитационной модели датчика, включающего только механическую преобразующую систему, снижает цену разработки вследствие отсутствия волоконно-оптического тракта и дорогостоящего электронного блока преобразования информации, а также неэффективных затрат на проведение многочисленных испытаний ВОДРД в процессе проектирования.

Список литературы

1. Патент РФ № 2290605, МПК6 G01 L 19/04. Волоконно-оптический преобразователь перемещения/ А. Г. Пивкин, Т. И. Мурашкина, Е. А. Бадеева. /Опубл.27.12.2006. Бюл. №36.

2. Бадеева Е.А. Технологические основы проектирования ВОД давления для искро-, взрыво-, пожароопасных инженерно-технических объектов / Е.А. Бадеева, А.Г. Пивкин, Т.И. Мурашкина // Надежность и качество: тр. Междунар. симп.: в 2 т.– Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2011. – Т. 2.

3. Функция преобразования дифференциального ВОД давления отражательного типа / Л.Н. Коломиец, Е.А. Бадеева, Т.И. Мурашкина, А.Г. Пивкин // Авиакосмическое приборостроение. – 2007. – № 8.

4. Коломиец Л.Н. Определение условий реализации дифференциального преобразования сигналов в волоконно-оптических преобразователях давления отражательного типа / Л.Н. Коломиец, Е.А. Бадеева, Т.И. Мурашкина // Авиакосмическое приборостроение. – 2007.– № 11.

5. Волоконно-оптические датчики / под ред. У. Эдда. – М.: Техносфера, 2008.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ БЕСЦЕНТРОВОГО КОНТРОЛЯ КРУГЛОСТИ

К.С. Фролов

Научный руководитель – профессор О.В. Захаров

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Тел. (8452)998639; E-mail ptk@sstu.ru

Обоснована принципиально новая конструкция прибора для бесцентрового контроля круглости. Особенность прибора заключается в использовании самораскрывающейся призмы и датчика линейных перемещений с переменным положением относительно призмы. Приведен расчет призмы на прочность и жесткость.

Ключевые слова: круглость, бесцентровое измерение, призма, прибор.

THE DESIGNING DEVICE FOR THE CENTERLESS CONTROL OF ROUNDNESS

K.S. Frolov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

Justified fundamentally new design device for centerless control roundness. Feature of the device is to use a self-revealing prism and the linear encoder with variable position relative to the prism. The calculation of the prism strength and stiffness.

Keywords: roundness, measuring centreless, prism, device.

Актуальность. Сущность бесцентрового метода измерения состоит в том, что деталь вращается и опирается на базирующие поверхности призмы непосредственно измеряемой поверхностью, а датчик линейных перемещений фиксирует совокупное проявление круглости и отклонения от соосности. Это приводит к возникновению систематической погрешности измерений, достигающей величины до 100 % [1]. Возможности компенсации этой погрешности на основе только конструктивных решений [2] или только математической обработки результатов [3] не обеспечивают необходимого эффекта.

Техническая значимость. Для реализации стратегии контроля на основе адаптивной подналадки разработан прибор с изменяющимся углом раскрытия призмы и угловым положением датчика линейных перемещений (рис. 1). Математическая модель работы прибора рассмотрена в работе [4].

Принцип работы прибора: деталь установлена на призму с начальным углом, датчик малых линейных перемещений (индикатор) установлен в начальное положение, шаговый двигатель вращает заготовку на 360° . После предварительного измерения призма и датчик меняют угол и действия повторяются, при этом достигается более высокая точность и обеспечивается минимальная систематическая погрешность измерения.

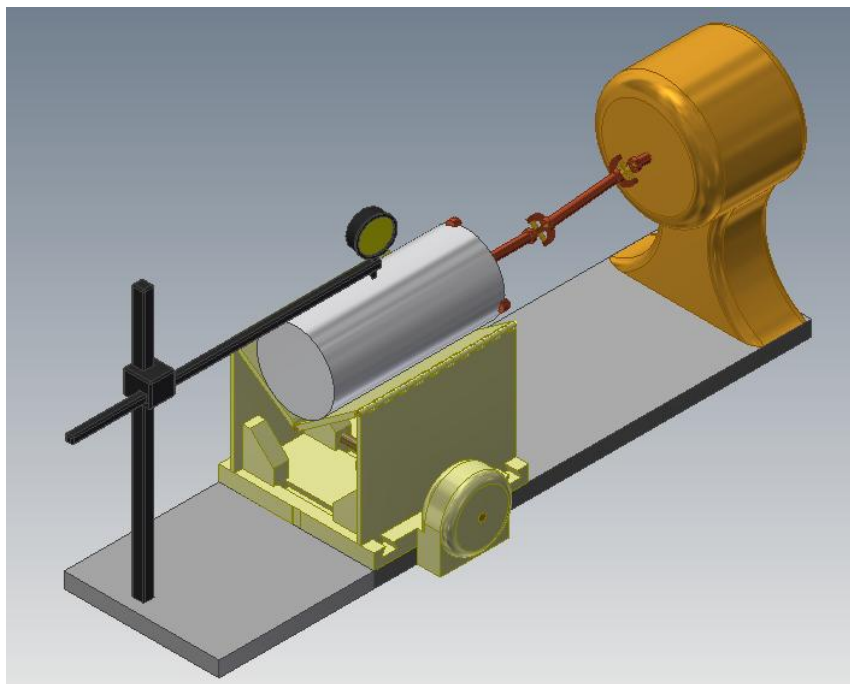


Рис. 1. Прибор для бесцентрового контроля

Моделирование. Самым ответственным элементом прибора является призма с изменяющимся углом раскрытия, и в процессе проектирования она подверглась более пристальному изучению. Были прочерчены основные элементы призмы, основание призмы, боковая стойка, дифференциальный винт и грань призмы.

Также было важно изучить влияние веса измеряемой детали на конструкцию призмы. В программе автоматического проектирования «Autodesk Inventor Professional» деталь базируется так же, как она закреплена в приборе. При приложении силы, равной весу в 50 кг, в направлении действия веса измеряемой детали на этот элемент будем иметь 3 расчёта: напряжение по Мезису, величина смещения и коэффициент запаса прочности.

Анализ напряжений боковой стойки призмы. Проведём моделирование, используя программу «Autodesk Inventor Professional». Наложим на боковую стойку призмы силу, равную 50 Н, при этом предварительно зафиксируем деталь так же, как она зафиксирована в сборке.

Физические параметры Моделирование:

Общая цель и параметры:

Материал	Сталь нержавеющая, 440С
Плотность	7,75 г/см ³
Масса	4,2732 кг
Площадь	92419 мм ²
Объем	551380 мм ³
Центр масс	x=12,358 мм y=80,083 мм z=11,069 мм

Цель проектирования	Одноточечный
Тип моделирования	Статический анализ
Дата последнего изменения	14.06.2014, 7:04
Обнаружить и устранить моды жесткого тела	Нет

Параметры сети:

Средний размер элемента (дробное значение от диаметра модели)	0,1
Минимальный размер элемента (дробное значение от среднего размера)	0,2
Коэффициент разнородности	1,5
Макс. угол поворота	60 град
Создать изогнутые элементы сетки	Да

Материал(-ы)

Имя	Сталь нержавеющая, 440C	
Общие	Массовая плотность	7,75 г/см^3
	Предел текучести	689 МПа
	Окончательный предел прочности растяжения	861,25 МПа
Напряжение	Модуль Юнга	206,7 ГПа
	Коэффициент Пуассона	0,27 бр
	Модуль упругости при сдвиге	81,378 ГПа
Тепловое напряжение	Коэффициент расширения	0,0000104 бр/С
	Теплопроводность	24,23 Вт/(м К)
	Удельная теплоемкость	160,57 Дж/(кг С)
Имена деталей	Копия (3) Деталь21111111111111	

Рабочие условия

Сила:

Тип нагрузки	Сила		
Величина	100.000 Н	Вектор Y	0.000 Н
Вектор X	92.938 Н	Вектор Z	-36.913 Н

Результаты

Сила и момент реакции в зависимостях

Имя зависимости	Сила реакции		Реактивный момент	
	Величина	Компонент (X,Y,Z)	Величина	Компонент (X,Y,Z)
Зависимость фиксации:1	132,842 Н	92,0333 Н	4,9807 Н м	-0,553266 Н м
		-0,754013 Н		-4,9407 Н м
		-95,793 Н		-0,301146 Н м
Зависимость фиксации:2	18,6943 Н	5,67053 Н	0,71767 Н м	-0,0744606 Н м
		-0,105512 Н		-0,713393 Н м
		-17,8132 Н		-0,0239944 Н м
Зависимость фиксации:3	242,879 Н	-190,573 Н	2,55599 Н м	1,19285 Н м
		0,850943 Н		-1,49543 Н м
		150,571 Н		1,69526 Н м

Результат

Имя	Минимальная	Максимальная
Объем	551380 мм ³	
Масса	4,2732 кг	
Напряжение по Мизесу	0 МПа	4,05075 МПа
1-е основное напряжение	-1,12969 МПа	2,6792 МПа
3-е основное напряжение	-4,4624 МПа	0,329946 МПа
Смещение	0 мм	0,00526009 мм
Коэфф. запаса прочности	15 бр	15 бр
Напряжение XX	-4,3356 МПа	1,42291 МПа
Напряжение XY	-0,967315 МПа	1,07946 МПа
Напряжение XZ	-0,517912 МПа	1,8194 МПа
Напряжение YY	-1,5198 МПа	1,20642 МПа
Напряжение YZ	-0,557058 МПа	0,606231 МПа
Напряжение ZZ	-2,8175 МПа	2,55768 МПа
Смещение по оси X	-0,0000715188 мм	0,00524564 мм
Смещение по оси Y	-0,000158702 мм	0,00013179 мм
Смещение по оси Z	-0,000531227 мм	0,000610165 мм
Эквивалентная деформация	0 бр	0,0000174952 бр
1-я основная деформация	-0,0000000706419 бр	0,0000127998 бр
3-я основная деформация	-0,0000205104 бр	0,0000000418086 бр
Деформация XX	-0,0000197313 бр	0,00000812509 бр
Деформация XY	-0,00000594335 бр	0,00000663236 бр
Деформация XZ	-0,00000318214 бр	0,0000111787 бр
Деформация YY	-0,00000887486 бр	0,00000693514 бр
Деформация YZ	-0,00000342266 бр	0,00000372479 бр
Деформация ZZ	-0,0000118911 бр	0,0000120531 бр

Аналогичным образом проведём моделирование грани призмы. Приложим силу, равную 100 Н, при этом предварительно зафиксируем деталь так же, как она зафиксирована в сборке.

Результаты расчета в графическом виде даны на рис. 2, где показаны напряжения по Мизесу, смещения и коэффициент запаса прочности для боковой стойки и грани призмы.

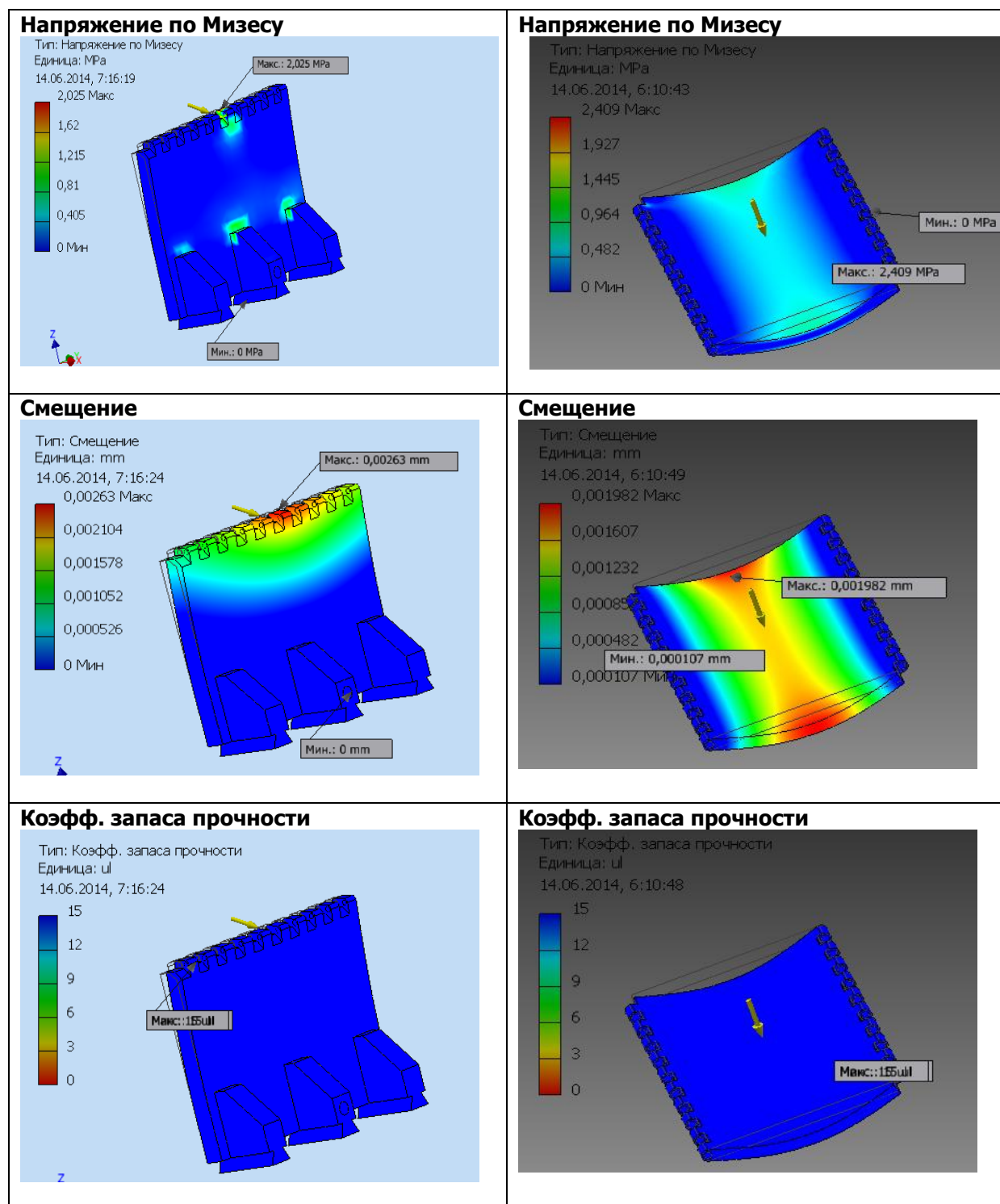


Рис. 2. Результаты расчета

Проведя анализ результатов, можно прийти к выводу, что рекомендуемый вес измеряемой детали будет составлять 50 кг, этот вес не приведёт к формоизменению конструкции в процессе измерения.

Список литературы

1. Авдулов А. Н. Контроль и оценка круглости деталей машин / А. Н. Авдулов. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 176 с.
2. Прецизионный кругломер / Я. И. Биндер, И. Д. Гебель, А. И. Нефедов и др. // Измерительная техника. – 1999. – № 8. – С. 25-27.
3. Захаров О.В. Методические основы гармонического анализа круглограмм / О. В. Захаров, В. В. Погораздов, А. В. Кочетков // Метрология. – 2004. – № 6. – С. 3-10.
4. Бржозовский Б.М. Информационное обеспечение бесцентрового измерения отклонения от круглости деталей / Б.М. Бржозовский, О.В. Захаров // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 4. – Вып. 4. – С. 48-53.
5. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014612744. Расчет отклонений от круглости деталей / П.Ю. Бочкарев, О.В. Захаров, В.В. Шалунов, Е.П. Решетникова. Оpubл. 6.03.2014.

УДК 537.5

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В КОНСТРУИРОВАНИИ ПЛОСКОПАНЕЛЬНЫХ ДИСПЛЕЕВ

Мохаммед Эль-Гомати, И.Ж.Кадыров
Университет Йорка, Великобритания

Предложена конструкция плоскопанельного дисплея на основе принципа полевой эмиссии. Качество изображения, даже при выходе из строя отдельных пикселей, остается прежним. Конструкция дисплея реализуется в тех же габаритных размерах, что и ЖК-дисплеи.

Ключевые слова: нанотехнологии, плоскопанельные дисплеи, эмиссия, изображение.

APPLICATION OF NANOTECHNOLOGIES IN DESIGNING PLAINLY-PANEL DISPLAYS

Mohamed El-Gomati, I.Z. Kadyrov
University of York, UK

The design of the plainly-panel display on the basis of a principle of field issue is offered. Quality of the image, even at failure of separate pixels, remains

former. The display design is realized in the same overall dimensions, as Zhk-displays.

Keywords: nanotechnologies, plainly-panel displays, issue, the image.

Введение. Наряду с традиционными конструкциями плоскопанельных дисплеев, такими, как плазменные панели (PDP - Plasma Display Panel), жидкокристаллические (ЖК) дисплеи (LCD – Liquid Crystal Display), вакуумные флуоресцентные дисплеи (VFD – Vacuum Fluorescent Display), электролюминесцентные дисплеи (ELD – Electroluminescent Display) [1] и другие, альтернативным перспективным направлением создания новых конструкций плоскопанельных дисплеев являются дисплеи, работающие на основе принципа полевой эмиссии (FED – Field Emission Display).

Постановка задачи. Под полевой эмиссией понимается поток электронов, проходящих через поверхность материала под воздействием сильного электрического поля [2]. Перспективность создания конструкций плоскопанельных дисплеев на основе принципа полевой эмиссии заключается в возможности сохранения яркости изображения при выходе из строя отдельных пикселей.

Так, например, если в жидкокристаллических дисплеях появляются неисправные пиксели, то качество изображения заметно ухудшится.

Метод решения. В отличие от них, в дисплеях, сконструированных на FED-принципе, за счет совершенно иного способа отображения изображения на дисплее, где для каждого пикселя использованы тысячи электронных эмиттеров – углеродных нанотрубок, служащих «остриями», испускающими электроны, даже при условии выхода из строя до 20 % из них, качество изображения на дисплее остается прежним.

В конструкции дисплея на основе FED-принципа использованы электронные пушки высокого напряжения.

Поток электронов сталкивается с люминофорами, каждый из которых состоит из зеленых, красных и синих подпикселей.

При этом цвет отображается в следующей последовательности – вначале вся зеленая информация, далее красная и синяя.

Пример реализации. Конструктивно FED-дисплей реализуется в тех же габаритных размерах, что и ЖК-дисплей. FED-дисплеи позволяют получать высокое качество изображения, глубокий черный цвет, высокую контрастность, большие углы обзора при низком энергопотреблении и отсутствии размытости изображения.

Принцип работы FED-дисплея проиллюстрирован на рис. 1.

Заключение. Предложена конструкция плоскопанельного дисплея на основе принципа полевой эмиссии. Качество изображения, даже при выходе из строя отдельных пикселей, остается прежним. Конструкция

дисплея реализуется в тех же габаритных размерах, что и ЖК-дисплей. Технология и конструкция отработаны в лаборатории наноинженерии университета Йорка, Великобритания.

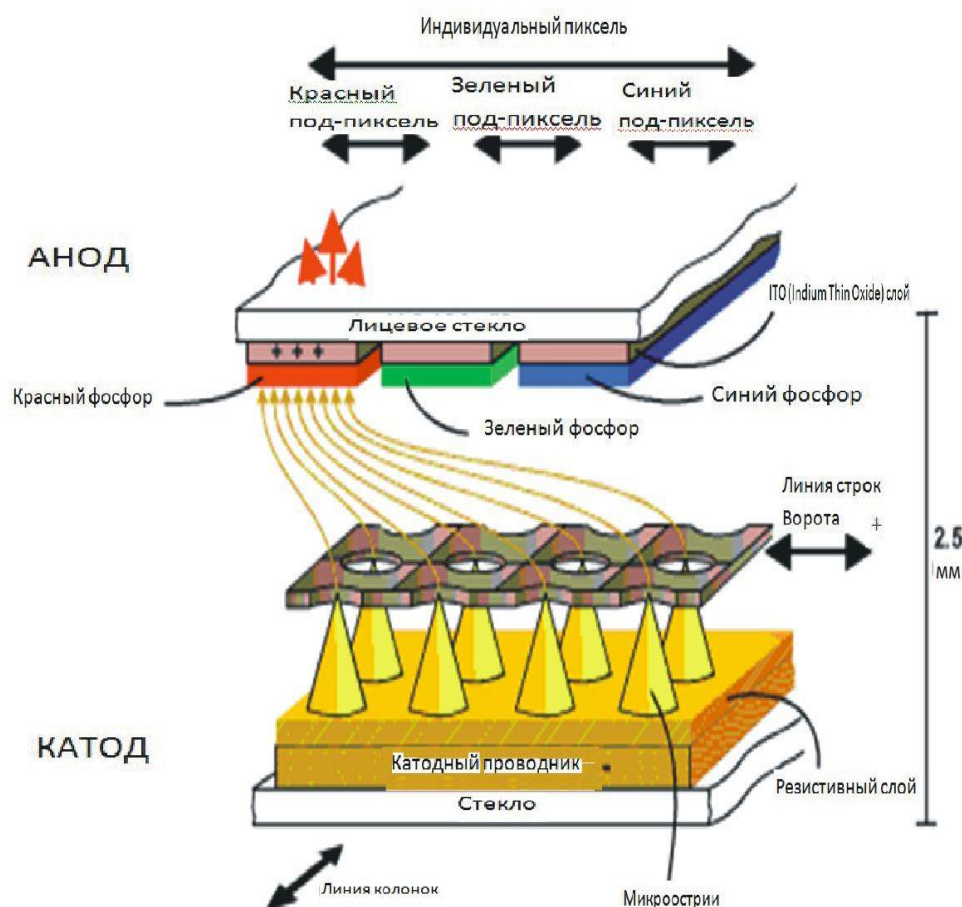


Рис. 1. Схема и принцип работы FED-дисплея

Список литературы

1. Jiun-Haw Lee, David N. Liu, Shin-Tson Wu, Introduction to Flat Panel Displays. Wiley Series in Display Technology (volume 20), Published by John Wiley & Sons, 2008.
2. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/206253/field-emission>
«Field emission. Encyclopedia Britannica online. Encyclopedia Britannica Inc. (accessed 25/07/12, 17:44).

Секция 5

Металлургия и материаловедение

СВЧ ОДНОМОДОВАЯ КАМЕРА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТИТАНАТА БАРИЯ

О.О. Карпова

СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

Тел. (8452)998763, e-mail: Olechkarpova@ya.ru

Предлагается конструкция СВЧ-установки для получения сегнетоэлектрических нанопленок на основе титаната бария. Рассмотрены области применения сегнетоэлектрических пленок, которые нашли широкое применение в микроэлектронике, электронике и оптоэлектронике. Представлен план разработки СВЧ-камеры на основе одномодового резонатора с частотой 2400 МГц.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, керамика, сверхвысокие частоты, микроволны, СВЧ-камера, одномодовость, резонатор, волновод, подложка, коллоидный раствор, титанат бария, наноструктуры, пленки, тонкие пленки.

SINGLE-MODE MICROWAVE ELECTRIC OVEN FOR GROWING SUCH NANOSTRUCTURED FILMS BASED ON BARIUM TITANATE

O.O. Karpova

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

Offers design microwave installation for obtaining segnetoelektricheskikh of nano-lenok on the basis of barium titanate. Considered application segnetoelektrika-ski films, which are widely used in microelectronics, electronics and optoelectronics. The plan for development of microwave-based camera single-mode resonator frequency 2400 MHz.

Keywords: Segnetoelektriki, ceramics, ultrahigh-frequency, microwave, microwave camera, odnomodovogo, resonator, waveguide substrate, kolloidnyi solution, barium titanate, nanostructures, film, thin film.

Достижения современной СВЧ-электроники нашли широкое применение во многих областях человеческой деятельности. В значительной степени это связано с простотой преобразования электромагнитной энергии из одного вида в другой и возможностью передачи энергии СВЧ-колебаний на значительные расстояния. Основными областями применения электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона являются радиолокация, радионавигация, связь и ускорительная

техника. Кроме того, их используют для нагрева, сушки и обработки различных материалов [2].

Существует так называемая одномодовая СВЧ-камера, которая имеет ряд преимуществ перед многомодовыми СВЧ-камерами. Преимущества одномодовости состоит в том, что одномодовый резонатор рассчитан на определенную частоту и имеет достаточно высокую добротность, а, как известно, чем выше добротность, тем меньше потери в заданной системе. Следовательно, можно создать необходимые условия для получения тонких сегнетоэлектрических пленок.

Наиболее конкурентоспособным по сравнению с металлами классом материалов для использования при высоких температурах является керамика. Применение керамики позволит снизить расход дорогих и дефицитных металлов: титана и тантала в конденсаторах, вольфрама и кобальта в режущих инструментах, кобальта, хрома и никеля в тепловых двигателях [3].

В настоящее время наиболее перспективны следующие направления применения керамики в ускорительной технике: фазовращатели и переключатели большой мощности для схем питания линейных ускорителей; управляемые ускорительные структуры с диэлектрическим заполнением.

Основным недостатком промышленно выпускаемой керамики являются достаточно большие потери мощности в СВЧ-диапазоне. Кроме того, при довольно высокой управляемости стандартная керамика обладает очень высокими для применения в ускорительной технике значениями диэлектрической проницаемости и диэлектрического гистерезиса [3].

Для создания приборов СВЧ-диапазона на базе пленочных сегнетоэлектриков необходимы пленки из материалов, обладающих одновременно достаточно сильной зависимостью диэлектрической проницаемости от приложенного поля и низкими потерями в СВЧ-диапазоне. Одним из наиболее перспективных на сегодняшний день таких материалов является титанат бария [2].

Сегнетоэлектрические материалы на основе твердых растворов титаната бария на протяжении многих лет исследуются и применяются для разработки сверхвысокочастотных приборов и устройств. Также он используется в качестве диэлектрика при изготовлении керамических конденсаторов, и в качестве материала для пьезоэлектрических микрофонов и пьезокерамических излучателей [2].

Существуют различные методы получения тонких пленок (термовакuumный, ионно-плазменный, ионно-лучевой, лазерный и др.). В данной статье описывается получение тонких пленок за счет нагрева заданного вещества (коллоидный раствор) до момента выпаривания жидкости из раствора и осаждения титаната бария на поверхности подложки. Достоинствами такого метода получения тонких пленок

являются — высокая чистота осаждаемого материала, универсальность (наносят пленки металлов, сплавов, полупроводников, диэлектриков) и относительная простота реализации [2].

На рис. 1 приведена конструкция СВЧ-камеры для получения сегнетоэлектрических пленок на основе наноструктурированного титаната бария.

В качестве обрабатываемого вещества предложен сегнетоэлектрик — титанат бария. Он представлен в виде коллоидного раствора, помещенного в устройство нагрева (СВЧ-камеру) 1, который будет размещаться в емкости заданных размеров на кремниевой или кварцевой подложке.

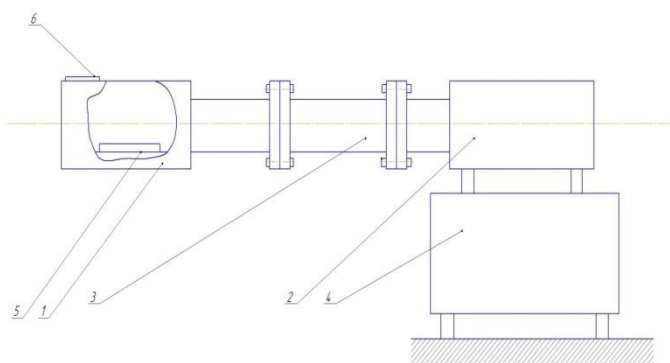


Рис.1. Конструкция СВЧ-камеры с одномодовым резонатором для получения сегнетоэлектрических пленок: 1 — СВЧ-камера; 2 — генератор; 3 — калориметр; 4 — источник питания; 5 — кварцевая подложка; 6 — заслонка

Под воздействием СВЧ-энергии происходит его осаждение на его подложку. Если температура подложки не превышает критического значения, происходит конденсация вещества на подложке, то есть рост пленки. На начальном этапе испарения во избежание загрязнения пленки за счет примесей, адсорбированных поверхностью испаряемого вещества, а также для вывода испарителя на рабочую температуру используется заслонка 6. В зависимости от функционального назначения пленки в процессе осаждения контролируются время напыления, толщина, электрическое сопротивление или какой-либо другой параметр. По достижении заданного значения параметра заслонка вновь перекрывает поток вещества, и процесс роста пленки прекращается [1].

Как известно, поскольку данная среда имеет очень малый $\operatorname{tg} \delta$, то конструкция резонатора будет рассчитана и спроектирована таким образом, чтобы непотребленная большая мощность уходила в калориметр.

Список литературы

1. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / О.Г. Вендик, И.В. Иванов, А.И. Соколов и др.; под ред. О.Г. Вендика. — М.: Советское радио, 1979.—272 с.

2. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин.– Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983. – 140 с.

3. Машкович М.Д. Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ / М.Д. Машкович.– М.: Советское радио, 1969. – 240 с.

УДК 678.5

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОЛИГОМЕРНЫХ СМОЛ В ХОДЕ ИХ ОТВЕРЖДЕНИЯ

А.В. Косарев, Д.О. Коваленко

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Тел. (8452)998530; E-mail: aleteia@mail.ru

Получена математическая модель, связывающая вязкость олигомерных смол в ходе отверждения с величиной степени их конверсии в сетчатый продукт, а также молекулярными параметрами смол (средней молекулярной массой и средним молекулярным объемом). Показано, что зависимость вязкости отверждающейся олигомерной смолы от продолжительности процесса носит экстремальный характер, что объясняется изменением характера движения системы после достижения точки гелеобразования. Приведены результаты экспериментального изучения кинетики отверждения ряда смол, рассмотренные в рамках предложенной модели.

Ключевые слова: олигомерная смола, вязкость, кинетика отверждения, математическое моделирование.

MATHEMATICAL MODEL OF CHANGE OF OLIGOMERIC RESINS RHEOLOGICAL PROPERTIES DURING CURING

A.V. Kosarev, D.O. Kovalenko

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

The mathematical model that links the viscosity of the oligomeric resin during curing with a degree of its conversion into cross-linked product, as well as the molecular parameters of resins (average molecular weight and the average molecular size) obtained in this work. We have determined that the viscosity of the oligomeric resin during curing has extreme character. It is due to the structural transition of the system when it reaches the point of gelation. The results of the experimental study of the curing kinetics of resins, considered in the framework of the proposed model are presented in this work.

Keywords: oligomeric resin, viscosity, curing kinetic, mathematical modeling.

Реология отверждающейся олигомерной системы является источником важной информации о технологии синтеза сетчатых полимеров и композитов на их основе. Принципиальными при этом являются данные об изменении вязкости таких систем в условиях отверждения. Так, в [1] разработана численная модель в рамках подхода Фан-Тьен-Таннера, базирующаяся на рассмотрении полимера, обтекающего сферическое тело, как упруговязкой жидкости. Авторами показано аномальное изменение вязкости раствора полимера и наличие продольной вязкости в течениях, обусловленных нормальным напряжением, что приводит к возникновению нелинейного поведения вязкостных свойств жидкости. Что касается термореактивных олигомерных смол, то для них отмечается зависимость вязкостных свойств от структуры межузловых цепей и в целом ньютоновский характер течения в широкой области изменения напряжений [2]. В [3] методом ротационной вискозиметрии установлено, что нарастание вязкости эпоксидного олигомера, модифицированного олигомерами различной природы в условиях отверждения, описывается скейлинговым уравнением. Авторами [4] разработана математическая модель, характеризующая кинетические закономерности вязкости ряда отверждающихся смол в условиях варьирования температуры. В [5] в рамках подхода Вильямса-Лэндела-Фэрри предложена модель, описывающая изменение вязкости эпоксидной смолы, содержащей отвердитель. Модельные подходы позволяют предсказать оптимальные условия эксперимента (температурный интервал, продолжительность отверждения) в разных условиях, таких как вакуумная инфузия, литье и т.д. [6].

Наша работа посвящена учету структурного фактора в модели, описывающей изменение вязкости олигомерной смолы в ходе отверждения. Нами проведены эксперименты по определению вида зависимости степени отверждения олигомерной смолы как функции от времени. В качестве объекта исследования была выбрана смола ЭД-20 (ТУ 2252-003-62517430-01, ООО «Экоклас»), в качестве отвердителя – полиэтиленполиамин (ПЭПА). Данные компоненты смешивали в соотношении 9:1, полученные образцы в кюветах помещали в термошкаф и выдерживали при фиксированных температурах (30, 40, 50 °C). Через интервалы времени, составляющие 5, 10, 20, 40, 60, 75, 90, 120 мин, вынимали образец, из которого отбирали по пять проб, определяли их массы ($m_{исх}$) и помещали в склянки с ацетоном. Склянки встряхивали и оставляли на 20 часов, после чего раствор декантировали и определяли на аналитических весах массу отвержденного остатка ($m_{отв}$). Величину степени отверждения x рассчитывали как массовую долю смолы,

образовавшей сетчатую нерастворимую структуру, относительно начальной массы смолы:

$$X = \frac{m_{отв}}{m_{исх}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Зависимость степени отверждения x от времени представлена на рис. 1.

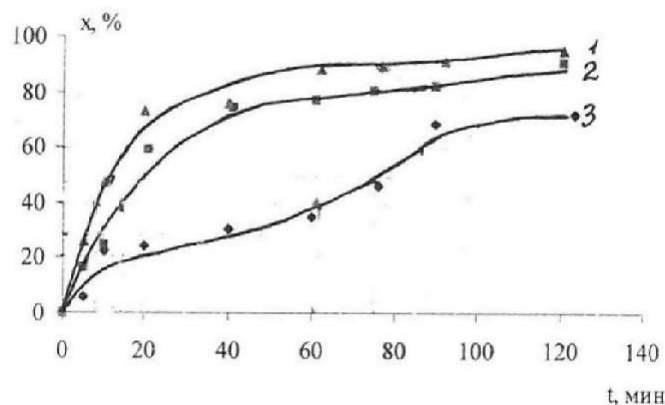


Рис. 1. Зависимость степени отверждения x смолы ЭД-20 от продолжительности отверждения (1- 50 °C; 2- 40 °C; 3- 30 °C)

Определим порядок и константу скорости процесса отверждения смолы ЭД-20 в рассматриваемом диапазоне температур. Согласно классическому закону действующих масс, средняя суммарная скорость процесса отверждения определяется соотношением:

$$\ln u = \ln k + n \ln(1 - x), \quad (2)$$

в котором величина n является угловым коэффициентом, а $\ln k$ – ординатой точки пересечения с осью $\ln u$. Значения константы скорости и порядка реакции в рассматриваемом температурном интервале приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения константы скорости и порядка реакции отверждения смолы ЭД-20 в температурном интервале 30÷50 °C

Температура отверждения	n	$k \cdot 10^4$
50 °C	0,77	11,905
40 °C	0,70	6,251
30 °C	0,62	2,083

Как видно из табл. 1, при увеличении температуры реакция отверждения приближается к процессам первого порядка. Увеличение кинетических параметров процесса (порядка реакции и константы скорости) при возрастании температуры объясняется повышением доли

активных молекул в реакционной системе. В связи с этим представляется интересной оценка энергии активации $E_{\text{акт}}$ процесса отверждения.

Энергия активации $E_{\text{акт}}$ процесса отверждения при определенной температуре определялась из зависимости $\ln u$ vs $1/T$ для ряда постоянных значений продолжительности процесса t_i . Величина $E_{\text{акт}}$ определялась по соотношению:

$$E_{\text{акт}} = -bR, \quad (3)$$

где b – угловой коэффициент зависимости $\ln u$ vs $1/T$; R – универсальная газовая постоянная. Аррениусовский множитель, являющийся мерой количества столкновений всех молекул отверждающейся олигомерной смолы в единице объема за единицу времени, может быть найден из рассматриваемой зависимости следующим образом:

$$\ln A = \lim_{1/T \rightarrow 0} \ln u. \quad (4)$$

Полученные регрессионные зависимости $\ln u = f(1/T)$ и значения аррениусовского множителя A для разных значений продолжительности отверждения приведены в табл. 2. Полученные регрессионные зависимости с увеличением продолжительности процесса становятся все более пологими, что свидетельствует об ослаблении влияния температуры на скорость процесса. Наблюдаемое снижение в среднем на порядок величины аррениусовского множителя при увеличении продолжительности процесса отверждения на каждые 20 мин объясняется снижением числа несвязанных молекул олигомера и увеличением стерических препятствий для их встречи за счет формирования сетчатого продукта в ходе отверждения.

Таблица 2. Оценка энергии активации процесса отверждения смолы ЭД-20

t , мин	Регрессионное уравнение $\ln u = f(1/T)$	Коэффициент детерминации R	A
20	$\ln u = -6692,7 \frac{1}{T} + 13,325$	0,9219	$6,12 \cdot 10^5$
40	$\ln u = -5466,2 \frac{1}{T} + 9,0576$	0,8528	$8,58 \cdot 10^3$
60	$\ln u = -4469,6 \frac{1}{T} + 5,6176$	0,8752	$2,75 \cdot 10^2$
80	$\ln u = -2704,7 \frac{1}{T} - 0,1368$	0,9256	0,87
100	$\ln u = -1610,2 \frac{1}{T} - 3,7709$	0,9575	$2,30 \cdot 10^{-2}$
120	$\ln u = -1263,1 \frac{1}{T} - 5,0041$	0,9199	$6,71 \cdot 10^{-3}$

Нами показано, что зависимость энергии активации $E_{\text{акт}}$, рассчитанной по соотношению (3), снижается в ходе процесса

отверждения. Наблюдаемое снижение энергии активации в ходе отверждения объясняется переходом диффузионной фазы этого процесса в кинетическую. Нами показано, что отношение объемных долей полимерной фазы в момент времени t и в момент гелеобразования τ может быть представлено соотношением:

$$\frac{\phi_t}{\phi_\tau} = \frac{x_t}{x_\tau} \quad (5)$$

В соответствии с [7], вязкость жидкости, содержащей распределенные твердые частицы, связана с вязкостью чистой жидкости соотношением:

$$\eta_t = \eta_0 \left(1 + \frac{1,25\phi_t}{1 - \phi_t/\phi_\tau} \right)^2 \quad (6)$$

Подставляя соотношение (5) в (6), получаем выражение для вязкости отверждающейся системы как функции структурных параметров (объема молекулы олигомерной смолы) и агрегационных характеристик (плотность, молярная масса смолы, степень конверсии в сшитый продукт):

$$\eta_t = \eta_0 \left(1 + \frac{1,25x_t\rho_{см}V_{ol}N_A}{M_{см}(1 - x_t/x_\tau)} \right)^2 \quad (7)$$

Нами показано, что зависимость вязкости отверждающейся олигомерной смолы от продолжительности процесса носит экстремальный характер, что объясняется изменением характера движения системы после достижения точки гелеобразования.

Итак, при увеличении степени конверсии до величины, соответствующей степени конверсии в точке гелеобразования, вязкость достигает своего критического значения, то есть значения, при котором изменяется механизм течения системы: если до этого критического значения вязкости материал течет в результате взаимного перемещения его отдельных частиц и их ансамблей, то после достижения критической вязкости он течет как единое целое за счет изменения формы. Модель позволяет прогнозировать вязкость до точки гелеобразования и актуальна для решения задач химической технологии и полимерного материаловедения.

Список литературы

1. Проявление неньютоновского эффекта при обтекании сферы ползущим потоком высоковязкой полимерной жидкости / Б.А. Снигерев, М.А. Кутузова, Г.Н. Лутфуллина и др. // Вестник Казанского технологического университета.-2009.- №1. – С. 48-51.

2. Реологические и релаксационные свойства mq -сополимеров / М.В. Миронова, Е.А. Татарина, И.Б. Мешков и др. // Высокомолекулярные соединения. – 2012. – Т. 54, №3. – С. 371.
3. Реокинетика отверждения модифицированного эпоксидного связующего / В.С. Осипчик, С.А. Смотрова, В.М. Аристов, И.Ю. Горбунова // Пластические массы. – 2012. – № 2. – С. 17-19.
4. A model of resin viscosity during cure in the resin transfer moulding process / N. Kiuna, C.J. Lawrence, Q.P.V. Fontana et al. // Composites. Part A. – 2002. – N 33. – P.1497-1503.
5. Teyssandier F. Modelling the Effect of the Curing Conversion on the Dynamic Viscosity of the Epoxy Resins Cured by an Anhydride Curing Agent / F. Teyssandier, M. Ivancović, B.J. Love // J. of Applied Polymer Sciences. – 2010. – Vol. 115. – P. 1671-1674.
6. An Empirical Model for Resin Viscosity During Cure in Vacuum Infusion Molding Process / J. Yang, J. Xiao, J. Zeng et al. // Applied Composite Materials. – June 2012. – Vol. 19. – Issue 3-4. – P. 573-582.
7. Chong J.S. Rheology of Applied Polymer Science / J.S.Chong, E.B. Christiansen, A.D. Baer // J. Appl. Polym. Sci. – 1971. – Vol.15. – P. 2007-2021.

УДК 621.9.048

УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Перинский, И.В. Перинская

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Тел. (8452) 998671; E-mail: perinskayaiv@mail.ru

Приведены неоспоримые преимущества модификации поверхности металла ионной имплантацией для увеличения усталостной долговечности, так как метод ионной имплантации является единственным методом без формирования покрытия и изменения геометрических размеров детали.

Ключевые слова: ионная имплантация, поверхностное модифицирование

FATIGUE LIFE IMPLANTED CONSTRUCTION MATERIALS

V.V. Perinsky, I.V. Perinskaya

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

Shows undeniable advantages metal surface modification by ion implantation for increasing the fatigue life, since ion implantation technique is

the only method without the formation of the coating and changes in the geometric dimensions of the part.

Keywords: ion implantation, surface modification.

Усталость есть процесс локальных структурных непрерывных изменений, происходящих в материале в результате изменения напряжений и деформаций, заканчивающийся трещиной или разрушением [1].

Итак, под усталостью подразумевается макроскопическая статистическая характеристика металла.

Видимыми признаками усталости металла являются трещины, коррозия, деформация, приводящие к разрушению. Причины изложены и систематизированы в работах российского ученого профессора А.А. Дубова, и основная из них – накопление энергии, необходимой для образования трещины, а атомная природа и механизм формирования усталости металла объясняются дислокационной структурой.

Имеется прямая связь улучшения характеристик конструкционных материалов от таких состояний поверхности, как:

- сопротивление износу;
- антифрикционные свойства;
- сопротивление коррозии [2].

В настоящее время используется ряд технологических процессов, с помощью которых контролируются эти свойства: вакуумное и плазменное напыление, оксидирование, азотирование и т.п., каждый из которых как минимум не универсален.

Ионная имплантация – метод поверхностной обработки с эффектом воздействия на характеристики поверхности и подповерхностного слоя материала без изменения геометрических размеров изделия.

Суть метода заключается во внедрении ускоренных ионов с энергией, достаточной для проникновения в поверхность и приповерхностный слой металла. Энергия, выше которой происходит внедрение ионов, составляет около $3-5 \times 10^{-18}$ Дж.

Метод ионной имплантации отличают следующие особенности [3,4]:

- практически любая комбинация металл-легирующий элемент;
- строго контролируемая концентрация легирующей примеси;
- предельная концентрация имплантируемой примеси, не зависящая от предела растворимости в металле;
- отсутствие загрязнений ненужными примесями (вакуумные условия процесса и предварительная масс-сепарация);
- компьютерное управление процессом ионного внедрения и возможность автоматизации;
- воспроизводимость параметров изделий.

Возможность технологии ионной имплантации определяется пределом концентрации вводимых ионов и толщиной слоя с необходимыми свойствами.

Недостатками метода ионной имплантации являются сопутствующий процесс десорбции, необходимость последующей термической активации, сложность и громоздкость ускорителей, радиационная опасность рентгеновского излучения. Однако, исходя из перечисленных неоспоримых преимуществ, поверхностное модифицирование металлов внедрением ионов с целью увеличения усталостной долговечности является, пожалуй, единственным методом без формирования покрытий и изменения геометрических размеров детали. Преодолению указанных недостатков посвящаются настоящая работа и цикл работ кафедры ФМТМ СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Список литературы

1. ASTM E 1150. USA Standart. Марки стали, свойства и мировые стандарты [Электронный ресурс] / <http://www.outokumpu.com/> (дата обращения 02.06.2014)
2. Дьяченко А.В. Машиностроение / А.В. Дьяченко, В.И. Ильин. – М.: Наука, 2005. – 325 с.
3. Перинская И.В. Наноструктурные факторы химической коррозии металлов, имплантированных ионами аргона / И.В. Перинская, В.В. Перинский // Технология металлов. – 2008. – № 10. – С. 20-22.
4. Перинский В.В. Физическая модель ионно-лучевого наноструктурирования твердых износостойких защитных покрытий с улучшенными высокотемпературными характеристиками ответственных деталей и узлов авиационно-космической техники / В.В. Перинский, В.Н. Лясников, И.В. Перинская // Технология металлов. – 2013. – №9. – С. 17-23.

УДК 679.56; (629.113.002.3)

ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ В ГРАНУЛАХ ВСПЕНЕННОГО ПОЛИПРОПИЛЕНА В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОБАРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Д.Ю. Поскребнева, А.В. Королева

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

Тел. 8-927-785-56-57; E-mail k13av90@rambler.ru

Рассматривается процесс теплообмена гранул материала вспененного полипропилена и окружающей среды в процессе производства изделий из этого материала. Доказывается возможность обработки

паром высокого давления без разрушения структуры строения материала. Определено время, в течение которого опасные температуры не достигаются.

Ключевые слова: вспененный полипропилен, теплообмен, ячеистая структура.

TEMPERATURE CONDITION IN GRANULES OF FOAMED POLYPROPYLENE IN THE PROCESS THERMOBARIC TREATMENT

D.Y. Poskrebneva, A.V. Koroleva

Togliatti State University, Togliatti, Russia

Examines the process of heat exchange granules material foamed polypropylene and environment in the manufacture of products made from this material. It is proved possibility of processing by high pressure steam without destroying the structure of the building material. It is proved possibility of processing high pressure steam without destroying the structure of the building material. Determine by time during which a dangerous temperature not attained.

Ключевые слова: foamed polypropylene, heat exchange, cellular structure.

Вспененный полипропилен (ВПП) как конструкционный материал обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с ранее применявшимися полимерами. Основной его особенностью является чрезвычайно низкая плотность изделий из него, находящаяся в диапазоне 20–110 кг/м³ и связанная с ячеистой структурой строения гранул полипропилена. Такая плотность позволяет получать изделия с большой жёсткостью и прочностью на единицу массы. Жёсткость пропорциональна кубу толщины детали, т.е. увеличение толщины вдвое приводит к увеличению жёсткости в восемь раз. Снижение плотности позволяет получать более толстые детали при снижении их массы, что является актуальным для транспортного машиностроения. Благодаря низкой плотности ВПП стал перспективным материалом для изготовления различных деталей автомобилей вместо деталей из монолитных полимеров.

В основе строения вспененных полимеров лежит газовый структурный элемент (ГСЭ) (рис. 1). ГСЭ является статически усреднённой моделью пространственной структуры, состоящей из газовой полости (ячейки) и её стенок и рёбер [1]. Это – элементарная единица материала, содержащая газовую и твёрдую фазы, которая повторяется внутри объёма материала с высокой степенью порядка и в итоге формирует макроструктуру вспененного полимера. Формы ГСЭ могут быть близки к форме сфер и неправильных многогранников. В исходном

состоянии ВПП находится в виде гранул, форма которых близка к форме шаров диаметром 1,5–4 мм. Поверхность гранул представляет собой тонкую плёнку из монолитного полипропилена, а внутреннее пространство заполнено ГСЭ, газовые полости заполнены атмосферным воздухом. Гранулы имеют преимущественно закрытоячеистую структуру, т.е. стенки ячеек непрерывны, а их полости не сообщаются друг с другом.

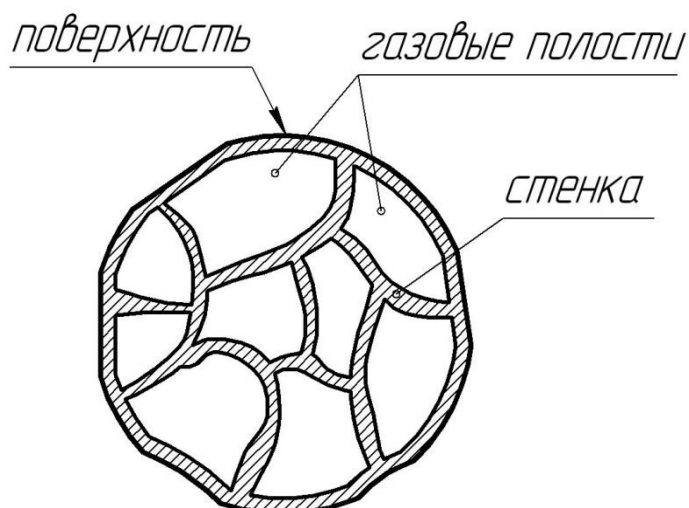


Рис. 1. Газовый структурный элемент

При производстве изделий из ВПП возникает важнейшая задача – сохранить строение материала таким образом, чтобы структура изделия представляла собой множество структур гранул, а физико-механические свойства, присущие отдельным гранулам, были бы полностью перенесены на изделие. Методы обработки пластмасс, основанные на расплавлении или размягчении материала, не пригодны для обработки ВПП, так как подобная обработка приведёт к разрушению ГСЭ и потере свойств. Для производства изделий из ВПП был разработан специальный метод формования, основанный на спекании гранул под воздействием термобарической обработки водяным паром высокого давления. В процессе обработки паром поверхность гранул разогревается, размягчается и становится способной к спеканию за счёт процесса диффузии. Так как поверхность имеет монолитное строение, то её разогрев не приводит к опасности деструкции. Но внутреннее пространство гранул должно оставаться достаточно холодным для сохранения исходной структуры строения.

Необходимо определить температурное состояние единичной гранулы ВПП в процессе обработки паром. Задачами расчёта являются:

- 1) определение скорости нагрева поверхности гранулы, состоящей из монолитного полипропилена;
- 2) определение температуры нагрева внутреннего пространства гранул, состоящего из ГСЭ;

- 3) определение времени обработки паром, достаточного для разогрева поверхности гранул и не приводящего к опасному перегреву внутреннего пространства.

Схема теплового взаимодействия гранулы и окружающей среды в процессе обработки показана на рис. 2. Окружающая среда представляет собой водяной пар с температурой 160-170°C, который является источником тепла. В качестве краевых условий процесса теплообмена мы приняли геометрическую форму нагреваемого тела как шар диаметром 3 мм. Также для представленной схемы приняты граничные условия первого рода:

- распределение температуры на поверхности гранулы является равномерным в каждый момент времени;
- температурное поле окружающей среды является стационарным:

$$t = f(x, y, z); \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0. \quad (1)$$

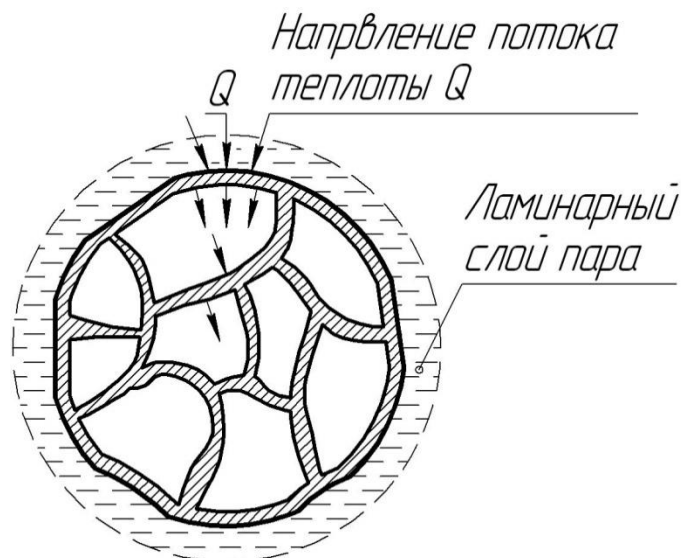


Рис. 2. Схема теплового взаимодействия пара и ВПП

Нагрев поверхности гранулы происходит в результате конвективной теплоотдачи при обтекании её потоком пара. Но непосредственная теплоотдача происходит от слоя пара, прилегающего к поверхности гранулы. Скорость потока пара, проходящего через объём гранул, невелика, поэтому около их поверхности существует устойчивый ламинарный слой, а теплообмен происходит между этим слоем и твёрдой поверхностью. Согласно гипотезе Фурье [2], количество теплоты Q , проходящее через изотермическую поверхность площадью S за промежуток времени τ , определяется по формуле:

$$Q = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot S \cdot \tau, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; $\frac{\partial t}{\partial n}$ – градиент температуры.

При условии, что в любой точке нагреваемой поверхности тепловой поток направлен по нормали к ней, для сферической поверхности радиусом R формула (2) преобразуется к виду:

$$q = -\lambda \cdot (t_{c1} - t_{c2}) \cdot 4\pi R^2 \cdot \tau, \quad (3)$$

где t_{c1} , t_{c2} – температуры на внешней и внутренней поверхностях стенки гранулы; q – тепловой поток.

Таким образом, за промежуток времени τ поверхность гранулы ВПП получит приращение внутренней энергии в виде количества теплоты Q . В наблюдаемых и измеряемых параметрах приращение энергии выразится в виде повышения температуры t_c монолитной стенки гранулы. Приращение температуры зависит от теплоёмкости нагреваемого вещества – полипропилена – и может быть определено по формуле:

$$Q = c \cdot m \cdot (t_{c3} - t_{c1}), \quad (4)$$

где c – удельная теплоёмкость вещества; t_{c3} – температура вещества после нагрева.

В результате исследования среза единичной гранулы было установлено, что толщина оболочки составляет 0,03-0,04 мм. С учётом сферической формы гранулы формула (4) преобразуется к виду:

$$Q = c \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot (R^3 - (R - 0,00003)^3) \cdot \rho \cdot (t_{c3} - t_{c1}), \quad (5)$$

где R – радиус гранулы; ρ – плотность вещества.

Удельная теплоёмкость полипропилена составляет 1,93 кДж/кг·°С, плотность – 920 кг/м³. Используя формулу (5), выполнен расчёт количества теплоты, необходимого для сквозного разогрева оболочки единичной гранулы до 132°С. Данная температура соответствует началу деструкции ГСЭ, в результате которой свойства ВПП могут быть утрачены. Для разогрева необходимо 0,16 Дж.

Зная количество теплоты, необходимое для разогрева оболочки, определим по формуле (3) время τ , за которое необходимая тепловая энергия будет получена от окружающей среды. Теплопроводность полипропилена составляет 0,22 Вт/м·К. Тогда при температуре пара 160°С тепловой поток составит 0,001 Вт, а время – не менее 158 с.

Как было сказано выше, гранула имеет оболочку, состоящую из монолитного полимера, и внутреннее пространство, состоящее из ГСЭ. После нагрева оболочки она становится источником теплоты, разогревающим внутреннее пространство гранулы. Как показывают расчёты, в течение 158 с не будут достигнуты температуры, способные привести к плавлению или размягчению стенок и рёбер ГСЭ, внутреннее

пространство гранул ВПП будет оставаться достаточно холодным для сохранения строения и свойств материала. В то же время поверхность гранул разогревается и становится способной к спеканию уже через 6-8 секунд после начала взаимодействия с паром, так как для возникновения процессов диффузии достаточно толщины материала в несколько молекул. Таким образом, в процессе термобарической обработки водяным паром могут быть получены изделия, структура строения которых состоит из множества структур гранул и которые имеют физические свойства, обусловленные ячеистой структурой вспененного полимера.

Список литературы

1. Клемпнер Д. Полимерные пены и технология вспенивания / Д. Клемпнер. – СПб.: Профессия, 2009. – 600 с.
2. Григорьев В.А. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник / под ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 557 с.

УДК 678

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВСПЕНЕННОГО ПОЛИПРОПИЛЕНА И ЕГО ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Д.Ю. Поскребнева, А.В. Королева

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

Тел. 8-927-785-56-57; E-mail k13av90@rambler.ru

Вспененный полипропилен имеет ряд существенных преимуществ как конструкционный материал. Его основной особенностью является низкая плотность, что позволяет достигать высокой прочности и жёсткости на единицу веса детали. Детали из вспененного полипропилена имеют высокую прочность в сравнении с другими вспененными пластмассами. В испытаниях деталей с плотностью структуры 40 кг/м³ была показана прочность 1,58 МПа.

Ключевые слова: вспененные пластмассы, прочность, деформация.

EXPANDED POLYPROPYLENE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND ITS POTENTIALS FOR APPLYING IN AIRCRAFTS

D.Y. Poskrebneva, A.V. Koroleva

Togliatti State University, Togliatti, Russia

Expanded polypropylene as engineering material has essential advantages. It allows to produce details of low density. That feature allows to

achieve high strength and rigidity for weight unit. Expanded polypropylene details have high strength, comparing with other foam plastics. Breaking strength 1,58 megapascal by details of 40 kg/m³ density was shown in tests.

Keywords: plastic foams, plastic foams details production.

В современной промышленности наблюдается рост применения полимерных пен. Вспененный полипропилен (ВПП) как конструкционный материал обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с ранее применявшимися полимерами. Основной его особенностью является чрезвычайно низкая плотность изделий из него, находящаяся в диапазоне 20–220 кг/м³, в то время как плотность монолитных конструкционных полимерных материалов составляет около 800-1300 кг/м³. Такая плотность позволяет получать лёгкие изделия с большой жёсткостью и прочностью на единицу массы, что относит вспененный полипропилен к группе лёгких и сверхлёгких материалов. В авиационной технике существенное влияние на характеристики летательного аппарата оказывают массовые показатели бортового оборудования и систем. Требования к обеспечению минимальной массы авиационных систем на всём протяжении развития авиации сохраняют актуальность [1].

В основе строения вспененных полимеров лежит газовый структурный элемент (ГСЭ) – элементарная единица материала, содержащая газовую и твёрдую фазы и состоящая из газовой полости (ячейки) и её стенок и рёбер. Формы ГСЭ могут быть близки к форме сфер, правильных и неправильных многогранников [2]. Вспененные полимеры могут иметь открыто- и закрытоячеистую структуру, т.е. содержать изолированные и сообщающиеся друг с другом полости ГСЭ. Эти различия в структуре строения формируют различные физические свойства вспененных полимеров. В исходном состоянии вспененный полипропилен находится в виде гранул, форма которых близка к форме сфер или эллипсоидов диаметром 2-5 мм. Гранулы имеют закрытоячеистое строение и непрерывную, замкнутую поверхность, схема которой показана на рис. 1.



Рис. 1. Гранула ВПП

Большинство существующих в настоящее время вспененных пластмасс не обладают достаточной прочностью для применения их в качестве конструкционных материалов в транспорте, в частности в летательных аппаратах. Так, прочность на разрыв наиболее плотного вспененного полистирола, с плотностью 50 кг/м^3 , не превышает $0,25 \text{ МПа}$. Гранулы этого материала легко отрываются друг от друга при незначительных внешних воздействиях. Вспененный полиэтилен обладает прочностью на разрыв до $0,5 \text{ МПа}$, но при этом является эластичным материалом, из которого нельзя изготовить жёсткую, устойчивую конструкцию.

Развитие науки о полимерах привело к созданию новой марки материала – вспененного полипропилена. Физико-механические свойства изделий из него намного превосходят все другие вспененные полимеры, что достигается как свойствами самого материала, так и методом его производства. В Тольяттинском государственном университете ведутся исследования свойств изделий из вспененного полипропилена и разработка методов их производства. Были проведены испытания образцов изделий с плотностью структуры 40 и 30 кг/м^3 . Оба вида изделий изготовлены из гранулированного ВПП с закрытоячеистой структурой методом спекания водяным паром высокого давления. Из средней части произведённых изделий были вырезаны образцы для исключения влияния свойств поверхности на результаты испытаний. В первой серии экспериментов проведены испытания на разрыв. На рис. 2 представлена диаграмма растяжения образца 40 кг/м^3 . Прочность составила $1,58$ и $0,57 \text{ МПа}$ соответственно для образцов 40 и 30 кг/м^3 . При этом относительное удлинение образцов в обоих случаях составило около 17% . Остаточной деформации не зафиксировано, после разрыва части образцов вернулись к исходной длине.

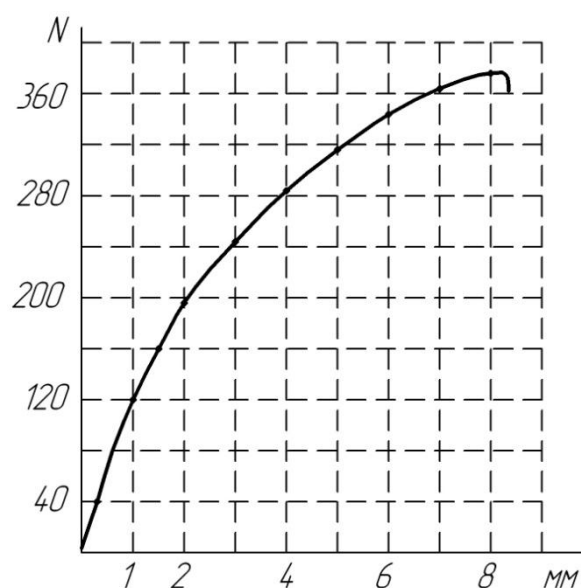


Рис. 2. Диаграмма деформация-сила

Следующая серия экспериментов – испытания на сжатие. В испытаниях достигалась относительная деформация 25, 50 и 75%. Результаты испытания на сжатие приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытания на сжатие изделий из ВПП

Плотность образца, кг/м ³	Напряжение, МПа, при относительной деформации, %		
	25%	50%	75%
0	0,17	0,25	0,52
40	0,22	0,34	0,74
Плотность образца, кг/м ³	Остаточная деформация, %, при относительной деформации сжатия, %		
	25%	50%	
30	7%	28%	
40	10%	36%	

В результатах испытаний на разрыв наблюдается значительная разница прочности двух марок материала, что является неожиданным результатом. Предполагалось, что разница прочности не будет столь существенной, учитывая испытания на сжатие. Объяснение этого факта, возможно, следует искать в технологии производства изделий и в достигаемой при этом прочности спекания и взаимного проникновения гранул материала. При наблюдении места разрыва образцов было обнаружено, что разрушение образца 40 кг/м³ проходит как по границам гранул, так и с разрушением самой гранулы. А линия разрыва образцов 30 кг/м³ проходит исключительно по границам спечённых гранул (рис. 3).

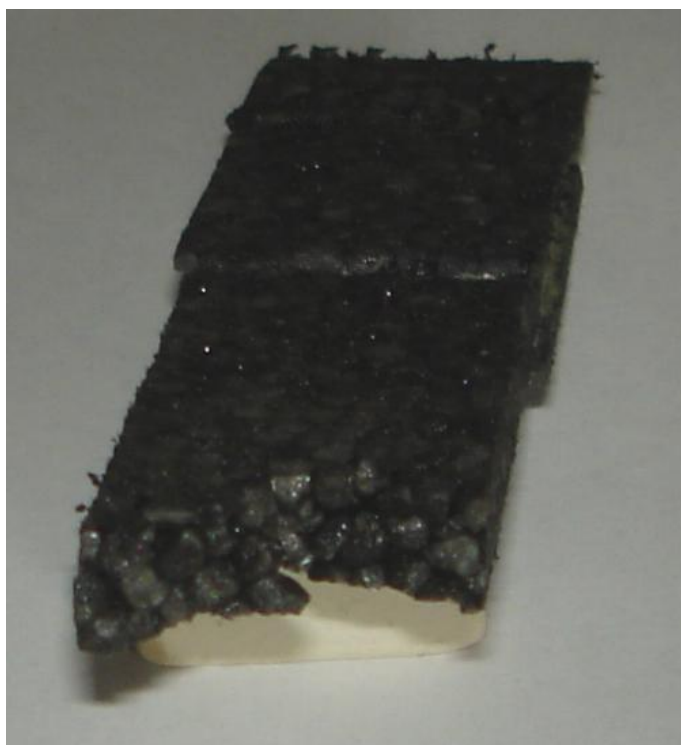


Рис. 3. Место разрыва образца

Сами гранулы материала остались неразрушенными. Можно предположить, что в первой группе образцов прочность спекания сопоставима с прочностью единичной гранулы, и при достижении достаточного напряжения разрушение происходило как в точках спекания, так и непосредственно тела гранулы. Во второй группе образцов прочность сцепления гранул была существенно ниже, чем прочность единичной гранулы, что привело к разрушению исключительно по линии контакта. На основании этого наблюдения можно сделать вывод о том, что технология производства изделий с плотностью 30 кг/м^3 имеет недостатки и не обеспечивает высокую прочность спекания гранул материала. Возможно, будут произведены усовершенствования технологического процесса и достигнута более высокая прочность изделий с плотностью 30 кг/м^3 .

Третий эксперимент направлен на установление стабильности размеров изделий. Перед испытанием размеры образцов были измерены и зафиксированы. Образцы помещались в термощкаф и выдерживались при температуре 100°C в течение 1 часа. После истечения этого времени образцы остывали в течение 4 часов до комнатной температуры ($23\text{-}26^\circ\text{C}$), а затем производилось повторное измерение размеров и их сравнение с результатами, полученными до испытания. Разница размеров образцов до и после термостатирования говорит о стабильности размеров. В результате испытаний было установлено, что разница размеров не превышает $0,8 \%$. Зависимости от плотности образца не выявлено.

В процессе испытания стабильности размеров часть образцов была оценена на изменение внешнего вида сразу после окончания термостатирования и извлечения из термощкафа. Изменения внешнего вида, отделения гранул, вздутия или вмятин, прилипания к рукам не зафиксировано. Таким образом, образцы полностью сохранили свой внешний вид и свойства восприятия человеком при нагреве.

Физико-механические свойства ВПП создают новые возможности по применению лёгких и сверхлёгких материалов при производстве летательных аппаратов. Прочность в $0,5 \text{ МПа}$ обеспечивает нормальную эксплуатационную прочность для изделий, не испытывающих существенных нагрузок в процессе эксплуатации. Это элементы внутренней обшивки салона, воздуховоды, элементы, создающие комфортабельные условия. Гранулы ВПП прочно удерживаются в объёме детали и не выкрашиваются при приложении внешних усилий. Поверхность изделий гладкая, имеет эстетичный внешний вид и создаёт ощущения комфорта, острые кромки полностью отсутствуют. Кроме того, в отличие от других вспененных пластмасс, тонкий поверхностный слой изделия представляет собой монолитный слой, газовые полости не выходят на поверхность изделия (рис. 4), поэтому ВПП не впитывает загрязнения и влагу. Свойства поверхности обеспечивают возможность

применять детали из ВПП без дополнительного покрытия поверхности лакокрасочными материалами или плёнками, что создаёт дополнительные условия для снижения массы.

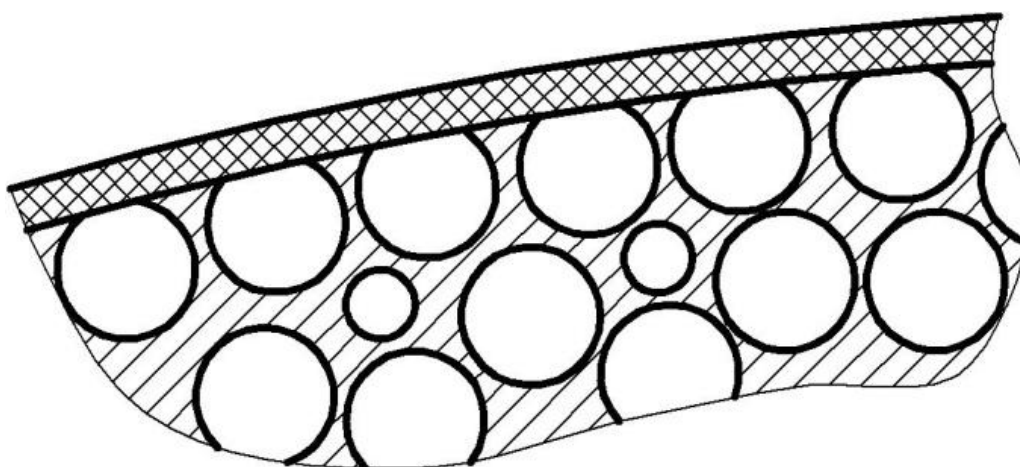


Рис. 4. Поверхность изделия из ВПП

Прочность на растяжение в 1,5 МПа позволяет производить детали, испытывающие нагрузки в процессе эксплуатации, с заменой монолитной пластмассы на ВПП с целью снижения массы изделий. К таким деталям относятся полки, опоры, работающие на сжатие, корпуса. Например, балке из монолитного полипропилена толщиной 10 мм по прочностным характеристикам при изгибающей нагрузке будет эквивалентна балка из ВПП толщиной 42 мм. Но вследствие своей низкой плотности масса изделия из ВПП будет в 5,5 раза легче, чем монолитный аналог. Таким образом, становится возможным значительное, до 80%, снижение массы пластмассовых изделий летательных аппаратов, при сохранении достаточной эксплуатационной прочности и при увеличении толщины или других размеров изделия.

Как показали испытания на сжатие, изделия из ВПП не подвергаются разрушению даже при деформации 75%. Образец равномерно деформировался по всей своей толщине, образования трещин, выкрашивания гранул, расслоений не зафиксировано. После снятия сжимающего усилия образец частично восстановил свою форму с образованием остаточной деформации. Результаты испытания говорят о высоких упругих и демпфирующих свойствах ВПП, способности многократно испытывать существенные деформации без разрушения, с последующим восстановлением своей формы и с сохранением допустимого внешнего вида.

Одним из наиболее эффективных направлений применения ВПП в летательных аппаратах может стать изготовление подушек авиационных кресел. Традиционная конструкция кресла включает в себя жёсткий

металлический каркас, регулировочные механизмы и подушки из пористых полимерных материалов или волокон различной жёсткости. В существующих конструкциях подушки кресел не выполняют функции восприятия нагрузки от тела человека или ускорений, а только создают необходимые параметры удобства и комфорта. Механическую нагрузку и напряжения, поддержание устойчивого положения, необходимую жёсткость всей конструкции создаёт металлический каркас. Подушка из вспененного полипропилена способна не только создавать параметры комфорта, но и воспринимать достаточную нагрузку и поддерживать жёсткость конструкции. Вследствие этого станет возможным исключить из конструкции кресла часть тяжёлых металлических деталей или уменьшить их толщину и размеры, переложив выполнение их функций на подушку. Вследствие низкой плотности необходимые размеры, обеспечивающие параметры прочности и жёсткости подушки, являются достаточно легко достижимыми. При этом необходимые размеры и толщина подушки будут достигнуты с одновременным снижением массы всего кресла. Внедрение ВПП в производство авиационных кресел наиболее интересно для пассажирских летательных аппаратов, где имеется большое их количество и даже небольшое снижение массы одного кресла существенно отразится на снижении массы всего воздушного судна.

Выводы. Вспененный полипропилен обладает высокими физико-механическими свойствами, ранее недоступными для других вспененных пластмасс. ВПП является перспективным для применения в качестве конструкционного материала в летательных аппаратах для замены тяжёлых монолитных полимеров. Изделия из ВПП имеют эстетичный внешний вид, создают ощущение комфорта. Применение ВПП способно привести к уменьшению массы отдельных элементов и летательного аппарата в целом при сохранении показателей прочности и жёсткости конструкции, решая задачу обеспечения минимальной массы авиационных систем.

Список литературы

1. Власов А.И. Исследование взаимосвязи массы и энергетической эффективности авиационных стартер-генераторов с воздушным охлаждением / А.И. Власов // Электроника и электрооборудование транспорта. – Томилино, ООО НПП Томилинский электронный завод. №4 2011. – С. 16-20.
2. Клемпнер Д. Полимерные пены и технология вспенивания / Д. Клемпнер, В. Сендиджаревич; пер. с англ. А.М. Чеботаря. – СПб. : Профессия, 2009. – 600 с.

**МИКРО- И НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ
БИОКОМПОЗИЦИОННЫХ БАКТЕРИЦИДНЫХ ПОКРЫТИЙ,
ПОЛУЧАЕМЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ
ИМПЛАНТАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Е.Ю. Пошивалова, И.В. Родионов, А.А. Фомин, А.Ю. Сюсюкин

СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

Тел: +79033802226, E-mail: syusyukinae82@mail.ru

Методом растровой электронной микроскопии исследованы микро- и наноструктуры биокomпозиционного покрытия на титане VT1-00, модифицированного серебром. Дана краткая характеристика структурного состояния покрытий в зависимости от их химического состава.

Ключевые слова: имплантат, ионы серебра, наноструктура, биосовместимое покрытие, титан, катодная модификация.

**MICRO- AND NANOSTRUCTURING OF BIOCOMPOSITE
BACTERICIDE COATINGS OBTAINED ON THE SURFACE OF
TITANIUM IMPLANT ITEMS**

E.Yu. Poshivalova, I.V. Rodionov, A.A. Fomin, A.Yu. Syusyukin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

By the method of scanning electron microscopy were used to study the micro- and nanostructure of biocomposite coatings on titanium VT1-00 modified with silver. The short characteristic of the structural state of the coatings, depending on the chemical composition.

Keywords: implant, ions of silver, nanostructure, biocompatible coating, titanium, cathode modification

В настоящее время актуальной проблемой современных изделий медико-технического назначения (имплантатов) является борьба с их отторжением, одной из причин которого является воспаление кости вокруг имплантата (переимплантит), для чего характерна постепенная убыль костной ткани (резорбция). Нежелательным последствием этого заболевания является отторжение имплантированной конструкции [1].

Для предупреждения подобного осложнения целесообразно использовать легирующие добавки (лантана, серебра, меди и других элементов), придающие антимикробные и антитромбоцитные свойства поверхности внутрикостных имплантатов [1, 3]. Наиболее благоприятным условием для повышения характеристик биосовместимости также будет формирование на поверхности биосовместимого покрытия,

характеризуемого наличием субмикрометровых и нанометровых элементов морфологии.

Цель работы заключается в определении условий получения наноструктурных характеристик биокomпозиционного покрытия, полученного газотермическим напылением (ГТН) и последующим катодным внедрением бактерицидных серебросодержащих компонентов.

Данная технология предусматривает ультразвуковое обезжиривание титановой основы медико-технических изделий в дистиллированной воде и спирте, воздушно-абразивную обработку электрокорундом, а также получение матричных покрытий, которые впоследствии подвергаются катодной модификации [1, 2].

Экспериментальные исследования микро- и наноструктуры полученных покрытий проводились с помощью метода растровой электронной микроскопии (РЭМ) с возможностью проведения энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа (ЭДРФА).

На рис. 1 представлены изображения РЭМ морфологии серебросодержащих покрытий кальций-фосфатной биокерамики.

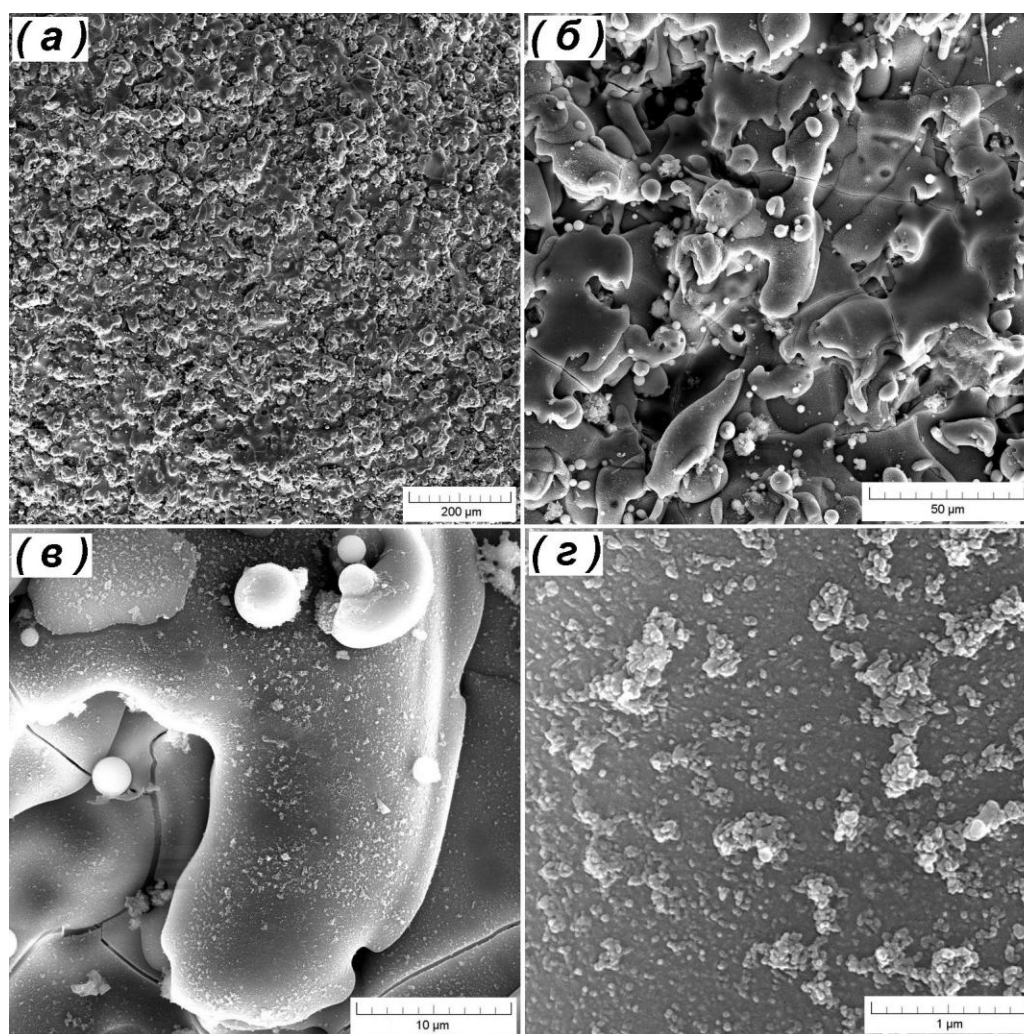


Рис. 1. РЭМ морфологии: а-в – микроструктура; г – наноструктура

Обработка данных РЭМ показала, что все титановые образцы с покрытиями характеризуются типовой микроструктурой, формируемой при ГТН. В структуре имеются равномерно распределенные микрометровые напыленные частицы (сплэты) порошка биокерамики, адгезионно-закрепленные на поверхности (рис.1,а). Структура отдельных сплэтов характеризуется нанометровыми элементами, равномерно распределенными по поверхности со средним размером 40 ± 10 нм, а также единичными агломератами нанозерен с характерным размером от 200 до 500 нм (рис. 1,б).

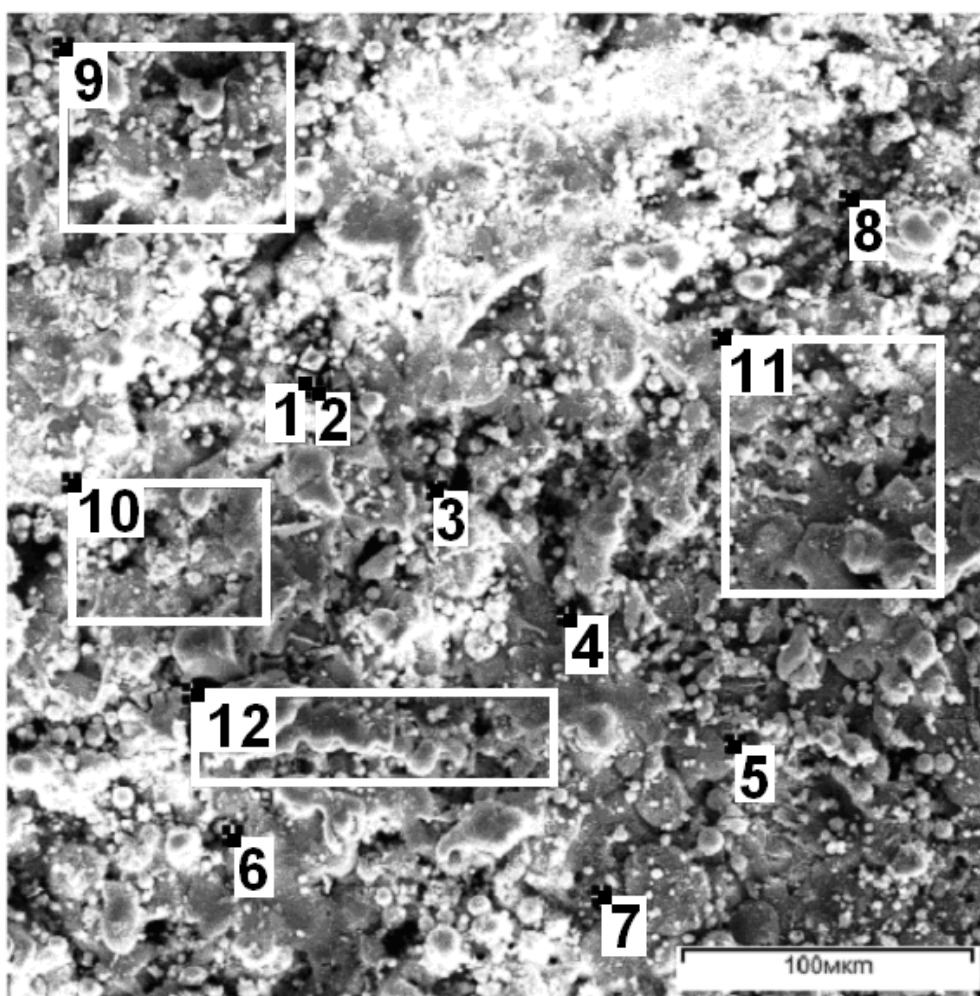


Рис. 2. Области определения химического состава покрытий (см. табл. 1)

ЭДРФА показал, что кроме основных составных элементов серебросодержащих ПН покрытий О, Р и Са с соответствующим содержанием ($40 \pm 15\%$), ($10 \pm 4\%$) и ($25 \pm 15\%$), имеются добавки Ti, Cr, Fe и Ag (рис. 2). Концентрация легирующей добавки серебра в покрытии составляет около 0,5...1,0 % (табл. 1).

В результате исследования установлена возможность катодного внедрения бактерицидного компонента (серебра) в матричное ПН

покрытие изделий медико-технического назначения – имплантатов. Дополнительное электрохимическое воздействие (катодная модификация) позволяет увеличить процент приживляемости титановых имплантатов с биокерамическими покрытиями.

Таблица 1. Содержание химических элементов в серебросодержащем покрытии (ат. %)

Спектр	C	O	P	Ca	Ti	Cr	Fe	Ag
1	18.38	40.82	13.21	26.33	1.05			0.21
2	16.46	42.78	13.14	26.57	0.97			0.08
3	23.55	23.41	9.77	40.13	2.60			0.53
4	19.31	55.13	8.30	16.25			0.69	0.32
5	19.06	54.85	10.23	15.26				0.60
6	37.29	34.03	9.84	17.23			0.55	1.05
7	27.31	50.63	8.30	10.41		0.64	2.11	0.60
8		29.62	14.99	38.19		4.01	12.4	0.82
9	14.06	53.69	10.59	18.90			2.36	0.41
10	22.63	47.67	9.93	18.48			0.91	0.37
11	19.27	45.60	10.49	17.41	0.33	1.45	4.92	0.52
12	36.05	41.80	6.46	11.49	0.65	0.40	2.85	0.31

Научные исследования проведены при финансовой поддержке проекта №1189 в рамках базовой части государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки РФ, в сфере научной деятельности.

Список литературы

1. Пошивалова (Сюсюкина) Е.Ю. Разработка комбинированной технологии электрохимического и электроплазменного формирования биоактивных композиционных покрытий: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.05, 05.09.10 / Е.Ю. Пошивалова. – Саратов, 2008. – 209 с.

2. Пошивалова Е.Ю. Влияние дисперсности порошка лантансодержащего гидроксипатита на микроструктуру и состав покрытий внутрикостных имплантатов / Е.Ю. Пошивалова, А.А. Фомин, В.Н. Лясников // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 2(98). – С. 40-43.

3. Родионов И.В. Физико-механические свойства и морфология гетерогенных металлооксидных структур, выращенных на биотолерантной коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9Т в нагретой воздушной атмосфере / И.В. Родионов, А.А. Фомин, Е.Ю. Пошивалова // Наноинженерия. – 2014. – №3 (33). – С. 27-31.

УДК 543.427; 621.785; 615.477

МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ОКСИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ШНЕКОВЫХ ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ

А.Н. Ромахин, И.В. Родионов, А.А. Фомин, Е.Ю. Пошивалова

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Тел.: (8452)998850, E-mail iv.rodionov@mail.ru

Проведены экспериментальные исследования шероховатости и морфологии поверхности металлокерамических оксидных покрытий, полученных на винтовой поверхности плоских колец шнека осадительной центрифуги из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Установлено, что с возрастанием температуры воздушно-термического оксидирования толщина оксидного микро- и наноструктурированного покрытия увеличивается. Разработаны оптимальные режимы оксидирования нержавеющей стали 12Х18Н9Т, позволяющие получить плотноупакованную структуру покрытий, обладающую повышенной механической прочностью.

Ключевые слова: шнек осадительной центрифуги, нержавеющая сталь 12Х18Н9Т, воздушно-термическое оксидирование, плотноупакованная структура покрытий.

SINTERED METAL OXIDE COATINGS IN PRODUCTION AUGER CENTRIFUGES STAINLESS CHROMIUM-NICKEL STEEL

A.N. Romahin, I.V. Rodionov, A.A. Fomin, E.Yu. Poshivalova

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

Experimental studies roughness and surface morphology metal-ceramic oxide coatings produced by the helical surface flat rings screw decanter centrifuge, stainless steel 12Ch18N9T. Found that with increasing air temperature thermal oxidation, the thickness oxide micro- and nanostructured coating increases. The optimal regimes oxidation stainless steel allowing 12Ch18N9T get packed structure coatings having improved mechanical strength.

Keywords: screw decanter centrifuge, stainless steel 12Ch18N9T, airborne thermal oxidation, packed structure coatings.

В настоящее время промышленностью России выпускается специализированное оборудование, предназначенное для машиностроительной, энергетической, авиационной и других высокотехнологичных отраслей. К числу такого оборудования относятся осадительные центрифуги – машины, используемые для очистки

жидкостей от механических примесей, а также для удаления воды из минеральных и синтетических масел. Данные машины именуются как стенды очистки гидрожидкостей (СОГ), выпуском которых активно занимается ОАО НИТИ-Тесар (г. Саратов), освоившее выпуск стандов еще в 1970-е годы. С 2004 года научный институт ведет разработку перспективного станда «СОГ-923», что, в свою очередь, приводит к необходимости решения как технологических, так и конструкторских задач, призванных значительно повысить надежность и качество очистки различных сред. Одной из таких задач является увеличение износостойкости винтовой поверхности плоских колец шнека осадительной центрифуги.

Кольца шнека изготавливаются из нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н9Т, имеют толщину 3 мм и работают в условиях гидроабразивного износа. Шнек станда типа СОГ-923 работает на скорости около 4000 об/мин в непосредственном контакте с очищаемыми жидкостями, такими как технологические и пищевые масла, сточные воды, содержащие кварцевый песок, металлическую стружку, агрессивные щелочи и кислоты. Незащищенная поверхность колец шнека из нержавеющей стали со временем изнашивается, что приводит к ухудшению качества очистки, а в дальнейшем и выходу из строя осадительной центрифуги.

Современными методами повышения качества таких поверхностей, а именно, увеличения твердости и износостойкости, являются следующие технологические операции:

- насыщение поверхности кубическим нитридом бора при высоких температурах;
- нанесение наплавкой покрытий из твердых сплавов;
- термомеханическая обработка поверхности и др.

Данные методы не всегда эффективны для применения, требуют больших затрат, специализированного дорогостоящего оборудования, что, в свою очередь, существенно повышает стоимость выпускаемой продукции.

Одним из методов повышения прочности и износостойкости поверхности изделий из нержавеющей хромоникелевых сталей является нанесение механически прочных металлокерамических покрытий путем воздушно-термического оксидирования. Данные покрытия, представляющие смесь оксидов металлов, упрочняют стальную поверхность, придают ей повышенную твердость и износостойкость, обеспечивают высокую коррозионную устойчивость при взаимодействии с химически агрессивными средами. Кроме того, для получения таких функциональных покрытий не требуется сложное, дорогостоящее оборудование, что способствует снижению стоимости выпускаемой продукции и повышает ее конкурентоспособность.

Термическое упрочняющее модифицирование поверхностей стальных (12Х18Н9Т) изделий с помощью процессов оксидирования позволяет придать им повышенную твердость и износостойкость за счет формирования на поверхности тонкого слоя собственных оксидов металлов, входящих в химический состав металлической основы. Образующиеся на поверхности металлооксидные соединения в виде покрытия отличаются от металла основы повышенными механическими, теплофизическими и антикоррозионными характеристиками, а также способностью длительное время сохранять свои функциональные свойства в условиях износа без разрушения металлооксидной матрицы [1, 2].

Методика исследований

Опытные образцы представляли прямоугольные пластины площадью рабочей поверхности 2 см^2 и толщиной 3 мм. Материалом образцов являлась нержавеющая хромоникелевая сталь 12Х18Н9Т (ГОСТ 5632-72). Поверхность пластинчатых образцов подвергалась пескоструйной обработке частицами корундового абразива Al_2O_3 дисперсностью 250 мкм при давлении воздушно-абразивной струи 0,67 МПа в течение 30 с с целью создания исходной микрошероховатости, обеспечивающей повышенную прочность сцепления формируемого оксидного покрытия с металлической основой. После предварительной пескоструйной обработки стальные образцы проходили ультразвуковую очистку в спиртовом моющем растворе при частоте УЗ-колебаний 22 кГц в течение 3 мин для удаления имеющихся жировых загрязнений (пленок), ухудшающих взаимосвязь создаваемых оксидных слоев с металлом.

Пескоструйная обработка образцов проводилась на установке типа «Сорокин 10.8», а их ультразвуковая очистка – в лабораторной УЗ-ванне.

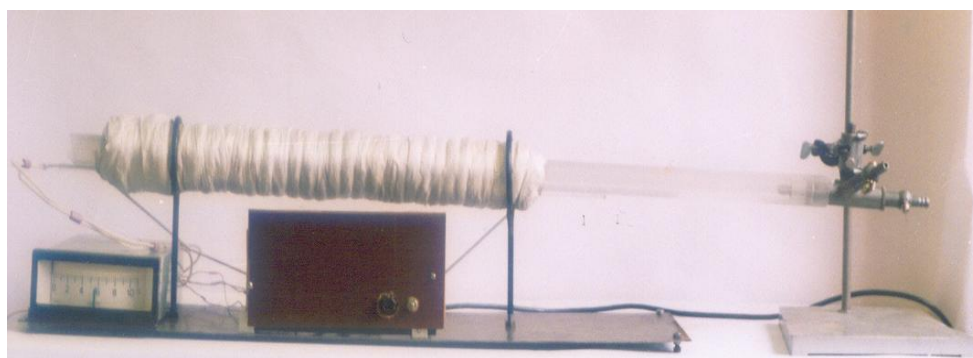
Воздушно-термическое оксидирование стальных образцов осуществлялось в экспериментальной трубчатой электропечи сопротивления в виде кварцевой трубки диаметром 40 мм с нихромовым спиральным нагревательным элементом и специальной асбестовой теплоизоляцией (рис. 1).

Значения напряжения на нихромовом нагревателе задавались с помощью лабораторного автотрансформатора и соответствовали определенным значениям температуры воздушной окислительной атмосферы в рабочей зоне печи. Режим оксидирования предусматривал нагрев образцов в печи до температуры 250, 300, 350 и 400⁰С с выдержкой 0,5, 1,0 и 1,5 ч при каждой температуре.

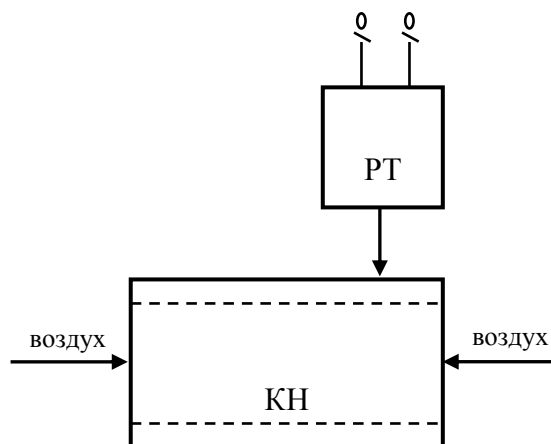
Шероховатость и микрорельеф поверхности формируемых покрытий исследовались профилометрическим методом измерения параметров микронеровностей R_a , R_z , $R_{\max}$, S_m по десяти базовым линиям с последующей математической обработкой результатов измерений. Оборудованием для исследования шероховатости служил микропроцессорный профилограф-профилометр «Калибр-117071», с

помощью которого проводилась оценка размерных параметров рельефа поверхности оксидных покрытий, а также мобильный прибор Hommel Tester T1000 Basic (Hommel Etamic) для контроля микрошероховатости.

Морфологические характеристики оксидных металлокерамических покрытий исследовались методом бесконтактного определения размерных параметров выступающих частиц и имеющихся углублений, включая поры, а также с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) с применением аналитического оборудования типа MIRA II LMU, Tescan.



а



б

Рис. 1. Лабораторная электропечь сопротивления:

а – общий вид кварцевой трубчатой электропечи для воздушно-термического оксидирования; *б* – схема электропечи для воздушно-термического оксидирования:

КН – камера нагрева печи, РТ – регулятор температуры

Результаты исследования и их анализ

В ходе профилометрических исследований установлено, что возрастание продолжительности оксидирования с 0,5 до 1,5 ч при $t=250^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению значений параметра R_a с 1,6 до 3,5 мкм, параметра R_z – с 12,6 до 30,5 мкм, параметра R_{max} – с 24,7 до 58,0 мкм, параметра S_m – с 53,6 до 62,8 мкм. Подобная кинетика изменения значений параметров

микронеровностей наблюдается и при других принятых в эксперименте температурах воздушно-термического оксидирования (табл. 1). Такая закономерность возрастания степени шероховатости оксидированной поверхности стали в зависимости от повышения температуры и продолжительности обработки связана с толщиной создаваемых покрытий, которая при своем существенном увеличении в процессе окисления стальной поверхности создает ее более развитый микрорельеф с наличием множества структурных микронеоднородностей [3].

Таблица 1. Параметры шероховатости оксидированных поверхностей нержавеющей стали 12Х18Н9Т, полученных термообработкой на воздухе при различных режимах

Продолжительность оксидирования τ , ч	Параметры шероховатости, мкм															
	R_a				R_z				R_{max}				S_m			
	Температура оксидирования, $^{\circ}\text{C}$															
	250	300	350	400	250	300	350	400	250	300	350	400	250	300	350	400
0,5	1,6	1,7	1,7	1,9	12,6	12,9	13,2	13,9	24,7	23,9	27,0	28,2	53,6	54,3	50,9	56,6
1,0	2,2	2,3	2,5	2,8	28,7	30,0	29,7	31,3	38,6	43,9	52,8	49,1	59,8	63,8	67,8	65,9
1,5	3,5	3,9	4,0	4,0	30,5	32,4	34,0	34,8	46,0	58,0	63,5	69,0	62,8	75,2	73,8	75,0

Эффект увеличения параметров шероховатости при увеличении температуры и времени оксидирования в первую очередь связан с образованием на поверхности нержавеющей стали оксидного покрытия, имеющего развитую кристаллическую структуру. Кристаллы данной структуры с увеличением температуры также увеличиваются, что приводит к росту параметров шероховатости. При увеличении температуры и продолжительности оксидирования создается более развитый микрорельеф поверхности с неоднородной структурой. Данное покрытие обладает высокой износостойкостью, а рельеф оксидной пленки способствует удержанию смазочных материалов в механизмах трения.

Установлено, что основное влияние на микроморфологию полученных оксидных покрытий оказывают толщина оксидного покрытия, режимы оксидирования и качество подготовленной поверхности. Полученные с помощью электронной микроскопии изображения поверхности оксидного покрытия на нержавеющей стали 12Х18Н9Т приведены на рис. 2-5.

В результате анализа микроизображений установлено, что поверхность покрытия, полученного при $t=250^{\circ}\text{C}$ и $\tau=1$ ч, имеет неоднородный характер и сложный рельеф (рис. 2).

Размеры пор варьируют в пределах нескольких микрометров, что говорит о достаточно высокой структурной сплошности поверхности. Оксидные кристаллы имеют размер порядка 2-3 мкм, формируют

плотнупакованную структуру покрытия, что свидетельствует о невысокой открытой пористости поверхности. При больших увеличениях поверхности покрытия наблюдаются субмикрористаллические и нанометровые частицы оксидов и их скопления, которые имеют плотную структуру. Данное покрытие, в целом, характеризуется сложно-кристаллическим строением. На электронных изображениях, полученных при максимальном в эксперименте увеличении, видны зародыши кристаллов овальной формы, которые с повышением температуры оксидирования увеличиваются в своих размерах.

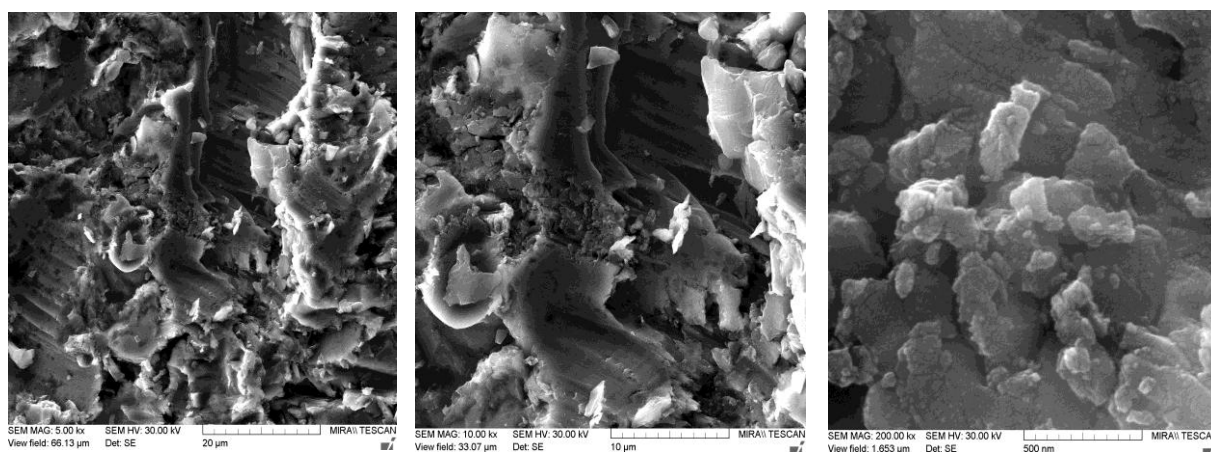


Рис. 2. Структура металлокерамического оксидного покрытия, полученного при $t=250^{\circ}\text{C}$ и $\tau=1$ ч

Из рис. 3 видно, что структура поверхности металлокерамических оксидных покрытий, полученных при температуре 300°C и продолжительности 1 ч, включает кристаллы меньшего размера в сравнении с кристаллами оксидного покрытия, полученного при температуре 250°C . Это связано с тем, что при повышенных температурах оксидирования формируется большее количество центров кристаллизации, на которых растут более мелкие частицы оксидов.

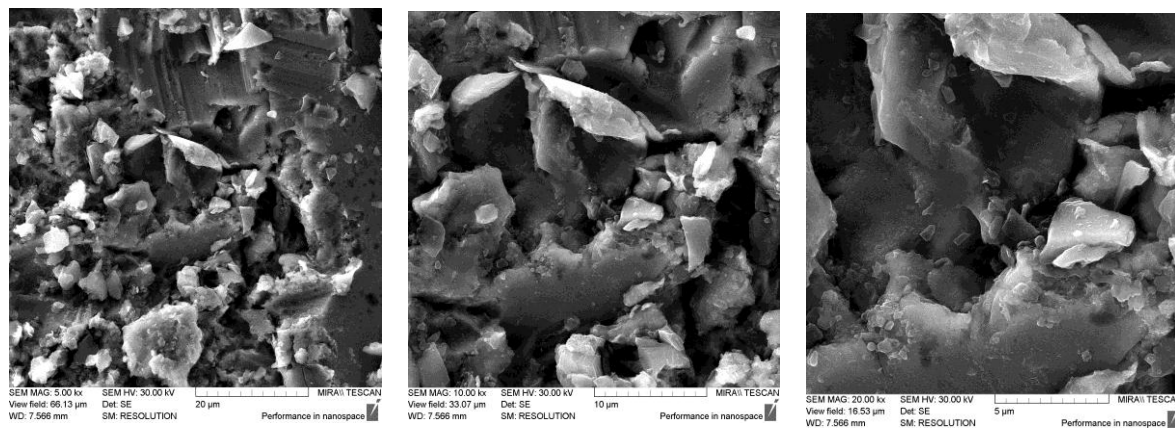


Рис. 3. Структура металлокерамического оксидного покрытия, полученного при $t=300^{\circ}\text{C}$ и $\tau=1$ ч

На изображениях (рис. 3) видно, что в структуре покрытия преобладают кристаллы октаэдрической формы, частицы оксидов с острыми гранями встречаются чаще. С возрастанием продолжительности оксидирования до 1,5 ч грани микрокристаллов оксидной пленки становятся округлыми, плотность покрытия также возрастает.

На рис. 4 можно проследить характер роста металлокерамического покрытия при температуре 350⁰С и продолжительности оксидирования 1 ч. В отличие от вышеописанных температурных режимов, появляются зародыши кристаллов, которые приобретают шаровидную форму. Кроме того, на таких кристаллах видны более мелкие кристаллы субмикрометрического размерного диапазона, что свидетельствует о возникновении новых очагов кристаллизации на уже сформированных более крупных частицах.

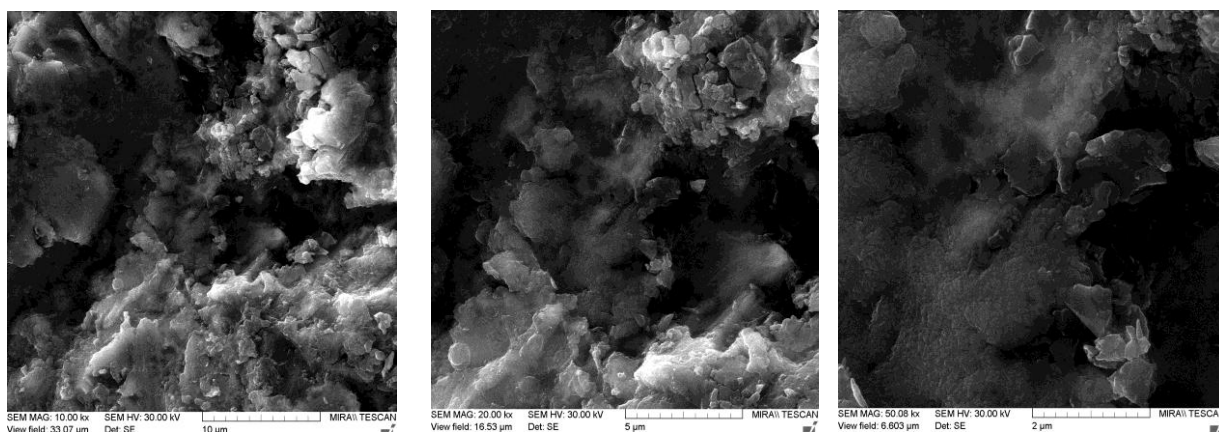


Рис. 4. Структура металлокерамического оксидного покрытия, полученного при $t=350^{\circ}\text{C}$ и $\tau=1$ ч

Структура покрытия при таком механизме роста становится более гетерогенной, пористость несколько возрастает, микрорельеф поверхности становится относительно развитым.

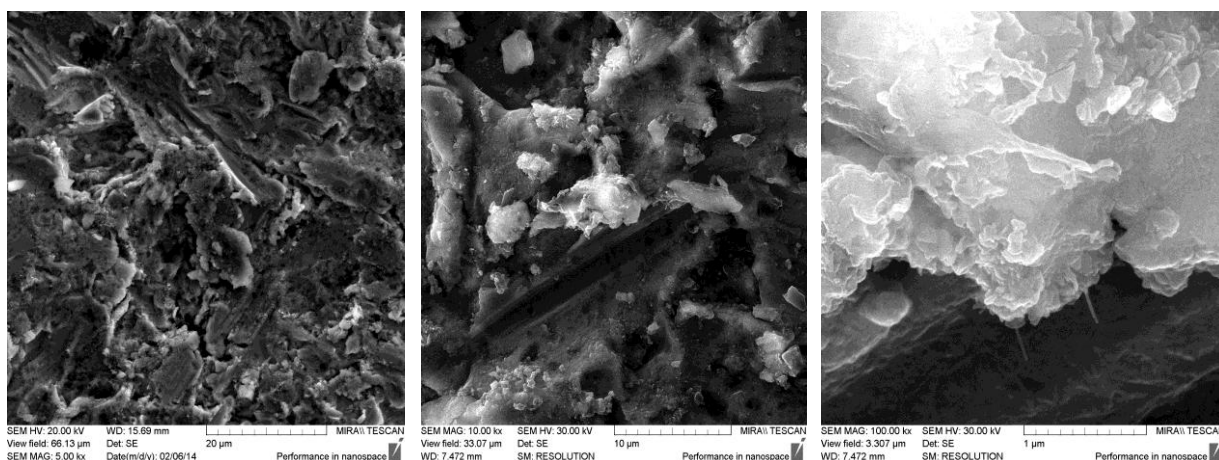


Рис. 5. Структура металлокерамического оксидного покрытия, полученного при $t=400^{\circ}\text{C}$ и $\tau=1$ ч

На рис. 5 представлены изображения оксидного покрытия, полученного при температуре оксидирования 400°C . Структура покрытия приобретает повышенную плотность распределения частиц, покрывающих основной металл. Кристаллы имеют шаровидную форму, размеры которых находятся в микро- и нанодиапазоне. С увеличением продолжительности обработки нержавеющей стали при данной температуре существенно возрастает количество мелких кристаллов, формирующих плотноупакованную структуру покрытия. При выдержке 1 ч на поверхности возникают трещины и глубокие поры, что говорит о большой толщине покрытия. Данные режимы оксидирования являются низкоэффективными для формирования металлокерамического покрытия на нержавеющей стали. Это можно увидеть из оптических изображений поверхности покрытий, полученных при продолжительности оксидирования 1 ч.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования шероховатости и морфологии поверхности металлокерамических оксидных покрытий, полученных на винтовой поверхности плоских колец шнека осадительной центрифуги из нержавеющей стали 12X18H9T.

С возрастанием температуры воздушно-термического оксидирования толщина оксидного микро- и наноструктурированного покрытия увеличивается. Размеры кристаллов в существенной степени зависят от выбранных режимов оксидирования. С ростом температуры увеличивается количество центров и очагов кристаллизации. Оксидные частицы с увеличением температуры приобретают шаровидную форму. При температуре оксидирования 400°C и повышенной продолжительности обработки на поверхности покрытия возникают крупные поры и трещины. Наиболее целесообразными режимами оксидирования нержавеющей стали 12X18H9T являются температуры 300, 350°C и продолжительность 1 ч. Металлокерамические покрытия, полученные при данных режимах, характеризуются тем, что оксидные кристаллы формируют плотноупакованную структуру покрытий, обладающую повышенной механической прочностью.

Список литературы

1. Родионов И.В. Применение процессов термического оксидирования для упрочнения поверхности стали 12X18H9T / И.В. Родионов, А.А. Фомин, А.Н. Ромахин // Технология металлов. – 2013. – №10. – С. 24-32.
2. Родионов И.В. Газотермическое оборудование для получения упрочняющих оксидных покрытий на металлах и сплавах различного назначения / И.В. Родионов, А.А. Фомин, А.Н. Ромахин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №9 (105). – С. 24-30.

3. Родионов И.В. Изменение микротвердости нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н9Т при упрочняющей термической обработке на воздухе и в среде перегретого водяного пара / И.В. Родионов, А.Н. Ромахин // Перспективы развития науки, техники и технологий: материалы II Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. – Курск: Юго-западный государственный университет, 2012. – Т.2. – С. 88-91.

УДК 621.385.624

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЩЕЛЕВОГО
ДВУХАЗОРНОГО РЕЗОНАТОРА МНОГОЛУЧЕВОГО
ДВУХЧАСТОТНОГО
СВЧ-ПРИБОРА**

Д.А. Нестеров, В.А. Царев

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Тел. 89372215327; E-mail enlucioro@gmail.com

Представлены результаты трехмерного моделирования электронных и электродинамических параметров щелевого двухазорного резонатора, позволяющего обеспечить высокую эффективность взаимодействия многолучевого электронного потока с СВЧ-полем одновременно на основной частоте, соответствующей противофазному виду колебаний, а также на частоте высшего синфазного вида колебаний. Найдены оптимальные режимы работы, при которых СВЧ-прибор на основе исследованного типа резонатора может быть использован в режимах усиления или генерации колебаний в устройствах СВЧ-нагрева, рассчитанных на работу одновременно на двух рабочих частотах.

Ключевые слова: многолучевой, двухазорный резонатор, щелевой резонатор, синфазный и противофазный виды колебаний, СВЧ-нагрев.

**INVESTIGATION CHARACTERISTICS OF SLOT DOUBLE-GAP
RESONATOR OF MULTI-BEAM DOUBLE-FRIQUENCY
MICROWAVE DEVICE**

D.A. Nesterov, V.A. Tsarev

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

The article presents the results of 3D modeling of electronic and electrodynamic parameters of slot double-gap resonator, allowing provide a high efficiency interaction of multibeam electron stream with the microwave field at the fundamental frequency corresponding to an antiphase-mode, and at higher-order in-phase mode frequency simultaneously.

In this research found optimal operating modes at which the microwave device based on the investigated resonator type can be used in amplification mode or generation mode for microwave heating devices designed to work on two operating frequencies simultaneously.

Keywords: multi-beam, double-gap resonator, slot resonator, inphase-mode, antiphase-mode.

Использование в многолучевых клистронах и гибридных приборах электродинамической системы, выполненной на основе двухзачорных резонаторов, позволяет уменьшить питающие напряжения, массу и габариты этих приборов, расширить полосу рабочих частот, а также реализовать двухмодовый режим работы за счет одновременного взаимодействия электронов с СВЧ-полем на основном и высшем видах [1]. Двухмодовый режим взаимодействия может быть полезен для создания СВЧ-усилителей или генераторов для установок СВЧ-нагрева, одновременно работающих на двух рабочих частотах. Двухзачорный резонатор является многочастотной колебательной системой, в которой возможны либо усиление, либо генерация СВЧ-колебаний.

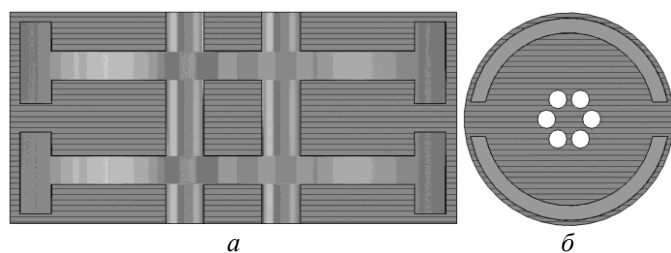


Рис. 1. Модель щелевого двухзачорного резонатора: *a* – вид сбоку; *б* – вид сверху

Рассмотрим параметры объемного резонатора щелевого типа в режиме усиления и генерации сигнала. Общий вид резонатора представлен на рис.1.

С помощью программы 3D - моделирования REZON [2] были рассчитаны электронные

и электродинамические параметры указанного резонатора. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры щелевого двухзачорного резонатора с равными длинами зазоров

Мода	U_0 , кВ	f , ГГц	Ψ	Q_0	M	G_e/G_0	B_e/B_0	γD , рад	ρ , Ом	ρM^2 , Ом
1 (f_1)	$U_{0y}=5.8$	2.495	π	2121	0.924	0.044	-0.353	3.920	35.308	30.161
	$U_{0r}=6.5$				0.926	-0.013	-0.338	3.707		30.301
2	$U_{0y}=5.8$	4.616	π	3209	0.223	0.248	0.386	7.253	19.189	0.960
	$U_{0r}=6.5$				0.344	0.358	0.307	6.858		2.271
3 (f_2)	$U_{0y}=5.8$	4.892	2π	2636	0.744	0.045	-0.437	7.687	18.106	10.029
	$U_{0r}=6.5$				0.740	-0.098	-0.407	7.269		9.940

В таблице 1 f_1 и f_2 обозначают кратные частоты первого и второго рабочего видов колебаний. В таблице 1 обозначены: f – рабочая частота, U_{0y} и U_{0r} – ускоряющее напряжение (для режима усиления и генерации

соответственно), Ψ – фаза ВЧ-поля, Q_0 – собственная добротность резонатора, M – коэффициент взаимодействия, G_e/G_0 – относительная активная проводимость, B_e/G_0 – относительная реактивная проводимость, $\gamma D = \omega \cdot (2d + l)/V_0$ – угол пролета двойного зазора, V_0 – скорость электронного потока, ρ – характеристическое сопротивление.

Согласно таблице 1, в СВЧ-приборе клистронного типа с резонаторами исследуемого типа возможны эффективное усиление на двух кратных частотах при ускоряющем напряжении $U_{0y} = 5,8$ кВ и эффективная генерация при $U_{0r} = 6,5$ кВ.

На рис. 2 представлены зависимости напряженностей продольной составляющей высокочастотного электрического поля от координаты Z вдоль канала для противофазного π -вида колебания и синфазного 2π -вида колебания.

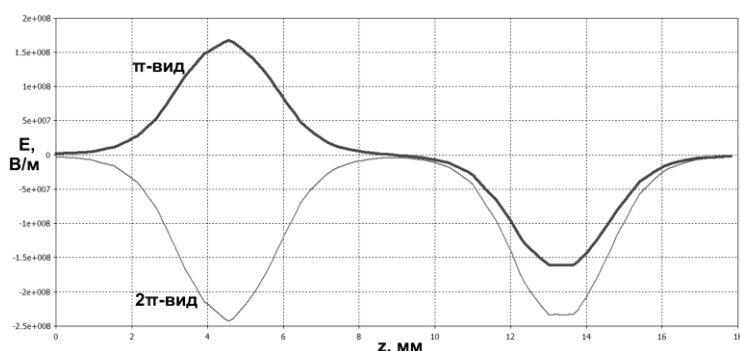


Рис. 2. Зависимость напряженности поля от координаты Z для двух видов колебаний

На рис. 3 приведены соответствующие картины полей.

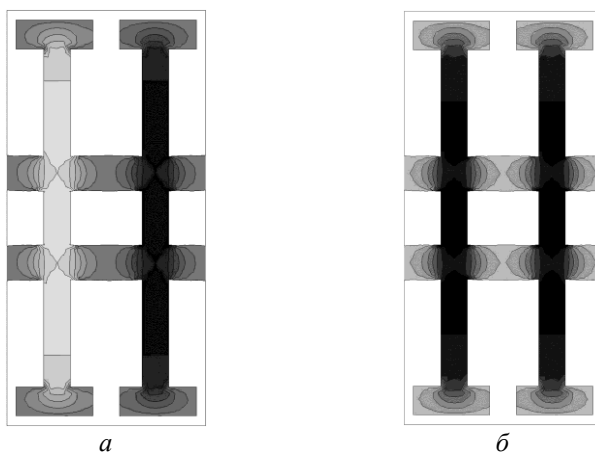


Рис. 3. Картины полей:
а – для π -вида колебания; б – для 2π -вида колебания

На рис. 4 представлены графические зависимости коэффициента взаимодействия и относительной активной проводимости от частоты, которые подтверждают возможность работы в режиме усиления и генерации.

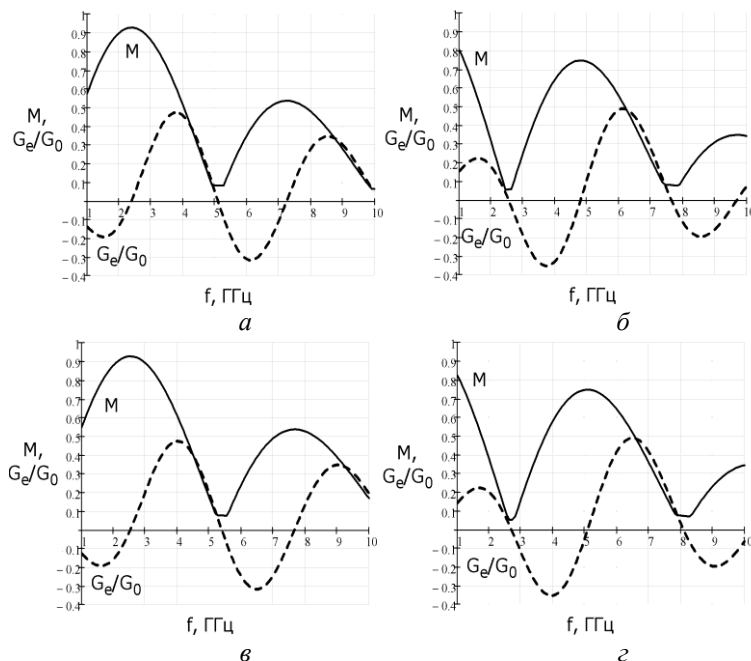


Рис. 4. Зависимости коэффициента взаимодействия и относительной активной проводимости от частоты: а – π -вид, усиление; б – 2π -вид, усиление; в – π -вид, генерация; г – 2π -вид, генерация.

При расчете резонатора были использованы следующие значения параметров: радиус резонатора $R=15,1$ мм, высота резонатора $H=16,2$ мм, радиус канала $a=1,6$ мм, радиус потока электронов $b=1,4$ мм, длина зазора $d=2,4$ мм, длина втулки $l=6,4$ мм, ускоряющее напряжение (для режима усиления) $U_{0y} \geq 5,8$ кВ, ускоряющее напряжение (для режима генерации) $U_{0r} \leq 6,5$ кВ, ток одного луча $I_{01}=0,14$ А.

Следует отметить, что оптимальные условия усиления и генерации были определены перебором значений ускоряющего напряжения.

Многолучевой СВЧ-прибор, электродинамическая система которого выполнена на основе представленного в данной работе щелевого двухзазорного резонатора, позволяет эффективно усиливать или генерировать колебания СВЧ-диапазона на двух рабочих частотах. Режим усиления выполняется при ускоряющем напряжении $U_{0y} \geq 5,8$ кВ, режим генерации при ускоряющем напряжении $U_{0r} \leq 6,5$ кВ.

Список литературы

1. Пат. 2390870 Российская Федерация, МПК7H01J25/02. СВЧ-прибор клистронного типа (варианты)/ Королев А.Н., Лямзин В.М., Мамонтов А.В., Симонов К.Г.; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». – №2009104517/09; заявл. 10.02. 09; опубл. 27.05.10.
2. Мучкаев В.Ю. REZON / В.Ю. Мучкаев, В.А. Царев // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2011611748 от 24.02.2011 г.

ВАКУУМНАЯ ПАЙКА ТЕПЛООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

С.Е. Цветков¹, Б.В. Копаев¹, В.В. Степанов²

¹ФГБОУ ВПО «МГИУ», г. Москва, Россия

²ФГУП «НПО «Техномаш», г. Москва, Россия

Тел. 8(495)689-97-47; E-mail s.e.tsvetkov@gmail.com

Рассмотрены пути повышения прочности теплообменной аппаратуры за счет замены широко применяемого на сегодняшний день сплава АМц на сплавы повышенной прочности типа АД31, АВ, 01515. Использование припоев с температурой плавления ниже 560°С, например, Ал12Г, не позволяет разупрочнять основной материал в ходе термического цикла пайки.

Ключевые слова: высокотемпературная пайка, теплообменный узел, алюминий и его сплавы, припой, паяное соединение.

VACUUM BRAZING HEAT EXCHANGE EQUIPMENT OF HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOYS

S.E. Tsvetkov¹, B.V. Kopaev¹, V.V. Stepanov²

¹Moscow State Industrial University, Moscow, Russia

²Federal State Unitary Enterprise «Tekhnomash», Moscow, Russia

Examined ways to increase strength of the heat exchangers by replacing the Al-Mn alloy on high strength alloys Al-Si-Mg- or Al-Mg-Sc- systems. Brazing alloys with melting point below 560 °C do not reduce strength of base material during the thermal cycle brazing.

Keywords: brazing, heat exchanger, aluminum alloys, brazing alloy, braze joints.

В настоящее время особую актуальность приобретает совершенствование качества продукции при одновременном улучшении использования трудовых и материальных ресурсов. Примером решения этой задачи является внедрение технологии бесфлюсовой пайки, а также использование новых материалов применительно к теплообменной аппаратуре из алюминиевых сплавов.

В промышленности применяются различные способы пайки алюминиевых сплавов. Наиболее широкое применение при изготовлении теплообменной аппаратуры получила флюсовая пайка, которая позволяет обеспечить высокую производительность процесса, но вместе с этим остатки флюса могут существенно снижать эксплуатационные характеристики изделия. В связи с этим, для получения ответственных

конструкций широкое распространение получила пайка в вакууме. Данный процесс позволяет обеспечить получение паяных конструкций с чистыми внутренними каналами теплообменника, что также увеличивает их рабочее сечение. В связи с этим вакуумная пайка находит широкое применение при изготовлении теплообменной аппаратуры, работающей в сложных условиях (повышенная пылезагрязнённость охлаждающей среды, необходимость длительной эксплуатации изделия, создание среды с замкнутым контуром охлаждения и т.д.).

В настоящее время в качестве основного материала при изготовлении элементов теплообменника применяется алюминиевый сплав марки АМц. Применение данного сплава обусловлено тем, что при производстве паяных конструкций ответственного назначения в качестве припоя используют сплавы на основе силумина, имеющие температуру плавления порядка 580-610°C и наряду с высокими технологическими свойствами обеспечивающие удовлетворительную коррозионную стойкость паяных соединений. Предел прочности после пайки не превышает, как правило, 80 МПа.

Повышение качества продукции теплообменных узлов можно достичь за счет увеличения прочности конструкции. В связи с этим увеличение прочности паяной конструкции необходимо осуществлять за счет применения материала большей толщины, что приведет к увеличению габаритов и массы конструкции. Применение новых материалов позволит обеспечить более высокую прочность, а также снизить вес и уменьшить габаритные размеры конструкции теплообменника.

Сплавы типа АВ и АД31, наряду с высокой прочностью, имеют низкую температуру солидуса (около 595°C) [1], что ограничивает их использование при пайке припоями на основе силуминов, температура плавления которых составляет 580-590 °C. Перегрев материала выше температуры солидуса в данных сплавах приводит к оплавлению границ зерен и, как следствие, к снижению прочности и охрупчиванию материала.

Сплавы на основе новых систем легирования и, в частности, сплавы на основе системы Al-Mg-Sc имеют более высокую температуру солидуса (630-640 °C) относительно сплава АМц, что позволяет использовать их в паяных конструкциях, получаемых с использованием припоев на основе силумина.

Для изготовления узлов теплообменной аппаратуры наиболее перспективными являются низколегированные сплавы системы Al-Mg, легированные скандием (например, 01515, 01523) [2], обладающие более высокой прочностью по сравнению со сплавом АМц (табл. 1). Вместе с этим, данные сплавы могут разупрочняться под воздействием термического цикла пайки, и степень разупрочнения сплава увеличивается с увеличением температуры нагрева под пайку [3]. Таким образом, для получения конструкций с наиболее высокими механическими свойствами

из алюминиевых сплавов требуется обеспечить снижение температуры пайки.

Таблица 1. Химический состав и механические свойства сплавов Al-Mg, легированных Sc [1]

Сплав	Среднее содержание основных легирующих компонентов, % мас.				Механические свойства в горячедеформированном или отожженном состояниях			Температура солидуса, °C
	Al	Mg	Sc	Zr	Б _В , МПа	Б _{0,2} , МПа	δ, %	
01515	Осн.	1,15	0,3	0,1	250	160	16	620
01523	Осн.	2,1	0,3	0,15	270	200	16	605
01535	Осн.	4,2	0,3	0,1	360	280	20	575
01545	Осн.	5,2	0,3	0,1	380	290	16	570
01570	Осн.	5,8	0,25	0,1	400	300	15	560

Достичь снижения температуры пайки можно за счет применения припоев с более низкой температурой плавления, по сравнению с силуминами. Использование более прочных сплавов может привести к пережогу основного металла и, как следствие, к уменьшению механических свойств паяной конструкции или потере устойчивости изделий, что приведёт к изменению их геометрической формы. В связи с этим для использования более прочных сплавов необходимо использовать припои с температурой плавления ниже 560-570 °C. При этом использование данных припоев для пайки сплавов 01515 и 01523 также позволит обеспечить увеличение механических свойств паяных конструкций за счет меньшего разупрочнения основного материала.

Среди таких припоев в настоящее время используются припои на основе систем Al-Si-Cu, Al-Zn и Al-Si-Ge (табл. 2).

Таблица 2. Состав припоев для пайки алюминиевых сплавов [3,4]

Марка припоя	Среднее содержание основных компонентов, %						Температура, °C	
	Al	Si	Cu	Zn	Ge	другое	плавления	пайки
СИЛ-0	Осн.	11-12	-	-	-	-	585-590	600
П34А	Осн.	5,5-6,5	27-29	-	-	-	525	535
П124А	Осн.	7	9-11	-	-	Cd-15 Pb-15	520	530
П575А	Осн.	-	-	19-21	-	-	575	580
Ал4Г	Осн.	8-10	-	-	4-5	-	570	580
Ал4ГМ	Осн.	8-9	9-10	-	4-5	-	540	550
Ал12Г	Осн.	8-9	-	-	10-12	-	550	560

Достаточно широко при пайке алюминиевых сплавов применяют припои на основе тройной эвтектики Al-Si-Cu (П34А, П124А) с низкой температурой плавления 520-530°C и системы Al-Zn (П575) с температурой плавления 575 °С. Вместе с тем наличие в составе припоя меди и цинка приводит к низкой технологической пластичности и снижению коррозионных свойств получаемых паяных соединений. Поэтому данные припои обычно не применяются для изготовления ответственных паяных узлов.

Перспективными в этом плане являются припои системы Al-Si-Ge, где для снижения температуры плавления системы Al-Si и сохранения необходимых свойств, в качестве основного легирующего элемента вводят германий, не образующий с алюминием хрупких интерметаллидных фаз. На основе данной системы можно выделить ряд припоев: Ал4Г, Ал4ГМ, Ал12Г. Температуры плавления припоев Ал4Г, Ал4ГМ составляют 565 и 540°C соответственно. Однако припой Ал4Г не получил широкого применения из-за высокой температуры плавления – 560-570°C, а также вследствие низкой пластичности припоя. Получение Ал4Г возможно только в виде прутков, что ограничивает его применение в ряде конструкций.

Припой Ал12Г с температурой плавления порядка 550°C по своим технологическим свойствам (смачиваемость, растекаемость, заполнение припоем зазора) аналогичен припою на основе силумина, но при этом обеспечивает более высокую коррозионную стойкость паяного соединения. Недостатком данного припоя является сложность изготовления и дороговизна легирующего элемента-германия. Вместе с этим он в наибольшей степени подходит для пайки алюминиевых сплавов повышенной прочности.

На основании выбранных материалов была разработана технология плакировки припоя Ал12Г на сплавы 01515 и 01523, заключающаяся в сборке с помощью заклёпок и последующем совместном деформировании на лабораторном прокатном стане. По данной технологии были получены листы с двухсторонней плакировкой, толщиной 0,8 и 1,2 мм. Металлографические и визуальные исследования не выявили отслоений припоя по основной поверхности листа.

Для опробования полученных листов изготавливались макеты теплообменников вакуумной пайкой в парах магния. Пайка проводилась в вакуумной камере типа КВН-2 с остаточным давлением 10^{-3} Па, температура пайки 560 ± 5 °С, время выдержки 3 мин.

Макетные образцы подвергались испытаниям на герметичность, путём создания в них избыточного давления воздуха и погружением в ванну с водой. В результате исследований на образцах не были выявлены течи. Проведённые металлографические исследования образцов показали формирование качественной галтели на всей протяжённости паяного соединения.

Выводы

1. Для изготовления теплообменной аппаратуры повышенной прочности наиболее целесообразно использовать вместо традиционного низкопрочного сплава АМц более прочные сплавы 01515 или 01523, легированные скандием.

2. Для пайки алюминиевых сплавов повышенной прочности предпочтительно использовать припои, обеспечивающие возможность нагрева под пайку до температур ниже 570 °С, что позволит обеспечить получение конструкций с наиболее высоким комплексом механических свойств. Среди таких припоев целесообразно использовать припои на основе системы Al-Si-Ge, поскольку они позволяют обеспечить получение удовлетворительных коррозионных свойств паяных соединений.

3. Для оценки свойств паяных конструкций были получены плакированные листы из сплавов 01515 и 01523, с двух сторон которых наносился припой Ал12Г. Пайка макетных узлов теплообменной аппаратуры с использованием плакированных листов позволила обеспечить получение качественных герметичных соединений. В связи с этим данные материалы можно рекомендовать для изготовления паяных конструкций повышенной прочности.

Список литературы

1. Фридляндер И.Н. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. изд. / И.Н.Фридляндер, Ф.И. Квасов. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
2. Филатов Ю.А. Al-Mg-Sc сплавы для сварных конструкций / Ю.А. Филатов // Технология легких сплавов. – 2004. – № 5. – С. 13-19.
3. Степанов В.В. Перспективы повышения прочности паяных конструкций из алюминиевых сплавов / В.В. Степанов, В.Ю. Конкевич, А.А. Суслов // Сварочное производство. – 2006. – № 8. – С. 37-42.
4. Справочник по пайке / под ред. И.Е. Петрунина. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 2003. – 480 с.

Секция 6

Моделирование и информационные технологии в машино- и приборостроении

АППРОКСИМАТИВНЫЙ АНАЛИЗ КОРОТКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДАННЫХ

Л.А. Долгих

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

Тел. +7 9023533614; E-mail ldmdlgh@mail.ru

Рассмотрены вопросы аппроксимации сигналов и функций сложной формы по экстремумам. Показано, что на основе аппроксимации колокольными импульсами могут быть определены спектральные характеристики сигналов.

Ключевые слова: аппроксимация, колокольный импульс, спектр.

APPROXIMATE ANALYSIS OF SHORT DATA SAMPLINGS

L.A. Dolgikh

Penza State University, Penza, Russia

The article considers signal and complex function approximation by extremums. The researchers demonstrate that the spectrum of signals can be determined on the basis of bell-shaped impulse approximation.

Keywords: approximation, bell-shaped impulse, spectrum.

Современная тенденция развития теории и практики анализа сигналов – разработка методов, обеспечивающих двумерную развёртку исследуемой одномерной выборки, в которых частота и координата являются независимыми переменными (время-частотные распределения, вейвлет-преобразование, преобразование Гильберта-Гуанга).

Однако все эти методы слабо применимы (так же как и классические методы спектрального анализа) в случае анализа коротких последовательностей данных. Под короткой последовательностью данных понимается последовательность, при использовании которой требуемое спектральное разрешение имеет тот же порядок, что и величина, обратная длине этой последовательности [1].

Достаточно высокую разрешающую способность при обработке коротких последовательностей дает использование параметрических методов спектрального анализа. Однако существует ряд факторов, ограничивающих их использование.

1. Привязка каждого параметрического метода к определенной модели обрабатываемых сигналов. В результате возможен случай, когда разные методы, используемые для анализа одной и той же последовательности данных, могут давать непохожие результаты. Кроме того, и сами данные должны быть хорошо согласованы с моделью,

положенной в основу применяемого метода, что на практике встречается достаточно редко.

2. Неоднозначность при определении априорного порядка модели обрабатываемых данных.

Все это приводит к тому, что правильный выбор параметрического метода спектрального анализа зависит от опыта и частично интуиции исследователя.

Именно поэтому до сих пор основным методом спектрального анализа сигналов было и остается преобразование Фурье (ПФ). Это связано со многими факторами:

- легкость интерпретации результатов преобразования Фурье;
- возможность анализа случайных сигналов;
- привычка пользователей.

К тому же аппарат ПФ настолько хорошо изучен, что появляется возможность учета его основных недостатков.

Строго говоря, преобразованию Фурье присущи два существенных ограничения:

- ограничение частотного разрешения, то есть способности различать спектральные линии двух или более составляющих;
- ограничение, обусловленное неявной весовой обработкой, которая приводит к «утечке» в спектральной области - искажению и наложению спектральных линий.

Уменьшить влияние указанных ограничений на результаты спектрального оценивания позволяет использование аппроксимации исследуемых дискретных данных: исследуемый сигнал раскладывается на составляющие, спектр которых известен, спектр исходного сигнала получают в виде суммы спектров всех составляющих.

1. Аппроксимация многоэкстремальных функций

Пусть $x(t)$ - функция, имеющая на некотором промежутке ровно N экстремумов с абсциссами $t_1, t_2, \dots, t_N$ и ординатами $y_1, y_2, \dots, y_N$. Наша задача – построить функцию

$$X(t) = \sum_{i=1}^N \tilde{y}_i \phi[\beta_i(t - \tilde{t}_i)], \quad (1)$$

где функция $\phi(t)$ и параметры $\tilde{t}_i, \tilde{y}_i$ и β_i должны быть выбраны так, чтобы $X(t)$ имела ровно N экстремумов, совпадающих с экстремумами $x(t)$.

В качестве базисных функций $\phi(t)$ предлагается использовать не стандартные ортогональные полиномы, применение которых зачастую связано с большими вычислительными затратами, а функции, имеющие вид «колокольного» импульса: e^{-x^2} , $ch^{-1}x$, $\frac{1}{1+x^2}$.

Параметры $\tilde{t}_i, \tilde{y}_i$ контролируют локальное поведение полинома в экстремальных точках, параметры β_i предназначены для организации глобального поведения аппроксимирующего полинома между экстремальными точками. Их можно использовать для различных целей: минимизировать чебышевское отклонение $X(t)$ от $x(t)$, добиться нулей $X(t)$ в заданных точках между экстремумами (если это возможно) и т.д.

Для нахождения параметров $\tilde{t}_i, \tilde{y}_i$ имеем систему из $2N$ уравнений с $2N$ неизвестными:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \tilde{y}_i \phi[\beta_i(t - \tilde{t}_i)] = y_i \\ \sum_{i=1}^N \tilde{y}_i \phi'[\beta_i(t - \tilde{t}_i)] = 0, j = 1, \dots, N. \end{cases} \quad (2)$$

Пусть $\lambda(t)$ - логарифмическая производная функции $\phi(t)$, тогда система (2) примет вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \tilde{y}_i \phi[\beta_i(t - \tilde{t}_i)] = y_i \\ \sum_{i=1}^N \tilde{y}_i \phi[\beta_i(t - \tilde{t}_i)] \lambda[\beta_i(t - \tilde{t}_i)] = 0, j = 1, \dots, N. \end{cases} \quad (3)$$

Полученная система алгебраических уравнений может быть решена относительно параметров $\tilde{t}_i, \tilde{y}_i$ различными методами. Например, можно использовать следующий подход: введем подстановки

$$\begin{aligned} \phi[\beta_i(t - \tilde{t}_i)] &= \phi_{i,j} \\ \lambda[\beta_i(t - \tilde{t}_i)] &= \lambda_{i,j}. \end{aligned}$$

Тогда (3) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \tilde{y}_i \phi_{i,j} = y_i \\ \sum_{i=1}^N \tilde{y}_i \phi_{i,j} \lambda_{i,j} = 0, j = 1, \dots, N. \end{cases} \quad (4)$$

Решив первые N уравнений относительно $\tilde{y}_i$, подставим полученные решения в остальные N уравнений и решим их относительно $\tilde{t}_i$. Таким образом можно организовать итерационную процедуру для определения вектора неизвестных параметров по заданным начальным условиям $\tilde{y}_0 = (y_1, y_2, \dots, y_N)$, $\tilde{t}_0 = (t_1, t_2, \dots, t_N)$.

Алгоритм аппроксимации исходного временного ряда гауссовыми функциями $e^{-\beta^2 x^2}$ исследован в [2], возможности использования результатов аппроксимации временных рядов в технических системах рассмотрены в [3].

В ряде случаев время анализа, а также возможности вычислителя являются критичными параметрами. Поэтому было решено исследовать возможность аппроксимации временного ряда функциями, вычисление значений которых не требует дополнительных временных затрат, в частности функциями $\varphi(t) = \frac{1}{1+at^2}$. В этом случае система (3) будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \tilde{y}_i \frac{1}{1+a_i(t_j - \tilde{t}_i)^2} = y_i \\ \sum_{i=1}^N \tilde{y}_i \frac{a_i \cdot (t_j - \tilde{t}_i)}{1+a_i(t_j - \tilde{t}_i)^2} \cdot \frac{1}{1+a_i(t_j - \tilde{t}_i)^2} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Параметр a базисной функции $\varphi(t)$ определяется значениями экстремумов и интервалов между ними. Методика определения параметра a для сигнала $\frac{1}{1+at^2}$ иллюстрируется на рис. 1.

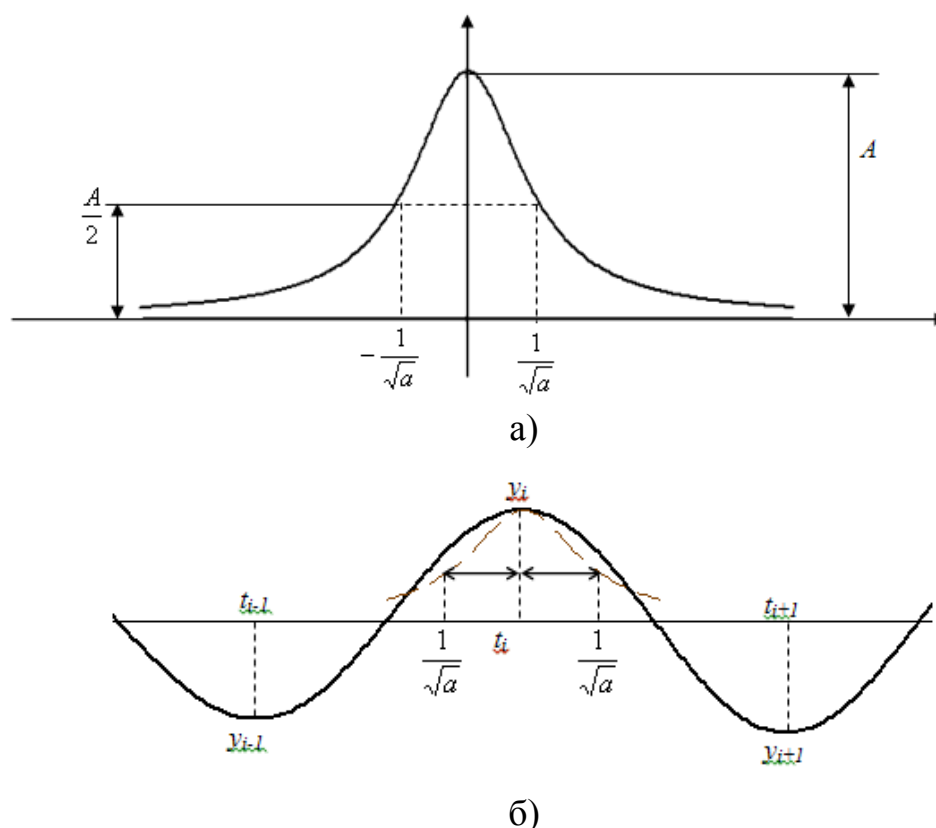


Рис. 1. Связь параметров и формы (а) и определение параметров составляющих сложного сигнала (б).

Другой подход к оцениванию параметров аппроксимирующего полинома описан в [4]. В этом случае реальный сигнал заменяется функцией:

$$X(t) = \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^{N_i} y_{k,i} \cdot \phi[\beta_{k,i}(t - t_{k,i})], \quad (6)$$

где $y_{k,i}, \beta_{k,i}, t_{k,i}$ - параметры приближающей функции; N - число экстремумов: N_1 - в исходной реализации, $N_2 - N_1$ - в разности $\varepsilon_1(t)$ между исходной реализацией и аппроксимирующей функцией; l - число итераций, необходимое для достижения заданной точности ε .

В случае использования функции $\phi(t) = \frac{1}{1 + at^2}$ результат аппроксимации исходного временного ряда записывается в следующем виде:

$$X(t) = \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^{N_i} \frac{y_{k,i}}{1 + a_{k,i}(t - t_{k,i})^2}, \quad (7)$$

где $y_{k,i}$ - экстремумы, $y_{k,1}$ - исходного ряда, $y_{k,2}, \dots, y_{k,l}$ - разности $\varepsilon_i(t)$ между исходной реализацией и аппроксимирующей функцией; $t_{k,i}$ - момент измерения, соответствующий экстремуму $t_{k,i}$.

Приведем в качестве примера результат аппроксимации при первом подходе и «нулевое» приближение (приближение, полученное без итерации с целью получения требуемой точности) (рис. 2) при втором подходе, для функции вида $A_1 \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) + A_2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t)$, где $A_1 = 2$, $A_2 = 1$, $\alpha = 0.05$, $f_1 = 0.676$ Гц, $f_2 = 0.82$ Гц, длительность интервала анализа - 10 с, интервал дискретизации 0,01 с (рис. 3).

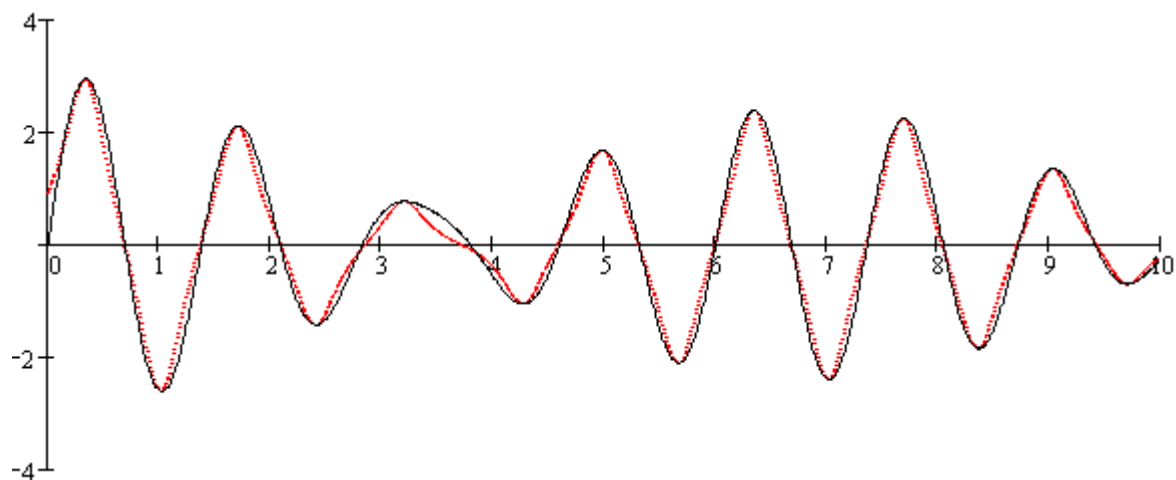


Рис. 2. Результат аппроксимации первым методом

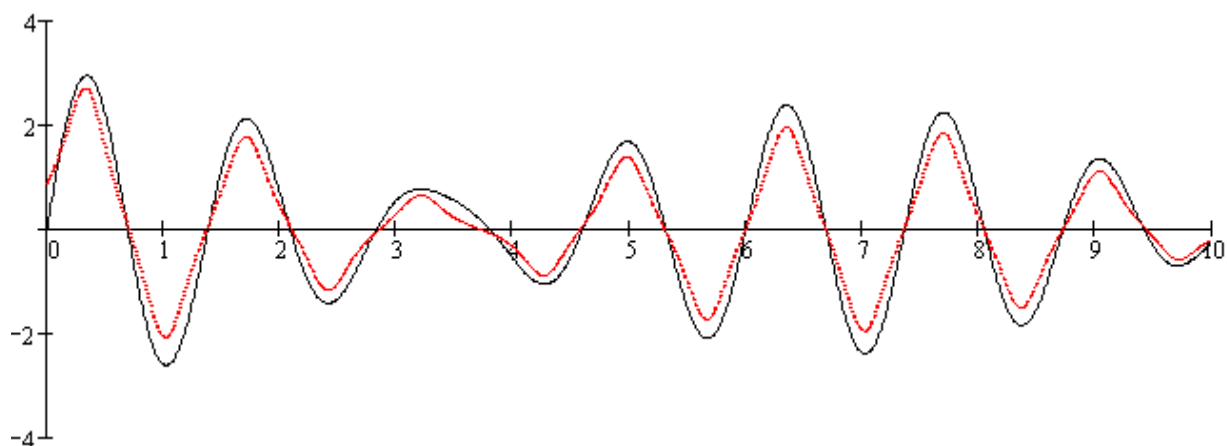


Рис. 3. Результат аппроксимации вторым методом

Сплошная линия соответствует исследуемому сигналу, линия из точек – результат аппроксимации. Видно достаточно хорошее совпадение исследуемого сигнала и аппроксимирующей функции.

У каждого из подходов есть свои достоинства и недостатки. В первом случае увеличение числа экстремумов реализации ведет к повышению трудоемкости решения задачи, что, однако, компенсируется меньшей погрешностью аппроксимации. Во втором подходе трудоемкость значительно меньше, но и погрешность аппроксимации по сравнению с первым подходом больше.

2. Расчет спектральной характеристики

В случае, когда для вычисления параметров аппроксимирующего полинома используется система (5), выражение для комплексного спектра имеет вид:

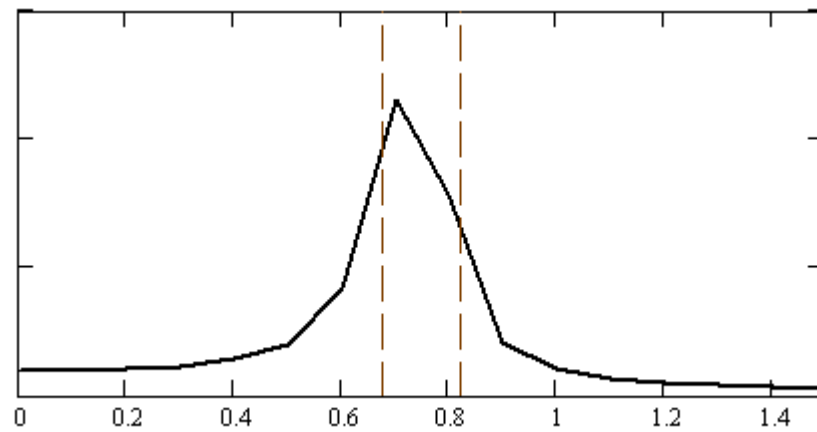
$$S(j\omega) = \pi \sum_{k=1}^N \frac{x_k}{\sqrt{a}} \cdot e^{\left| \frac{-\omega}{\sqrt{a}} \right| - j\omega t_k}. \quad (8)$$

При другом подходе комплексный спектр вычисляется по следующей формуле:

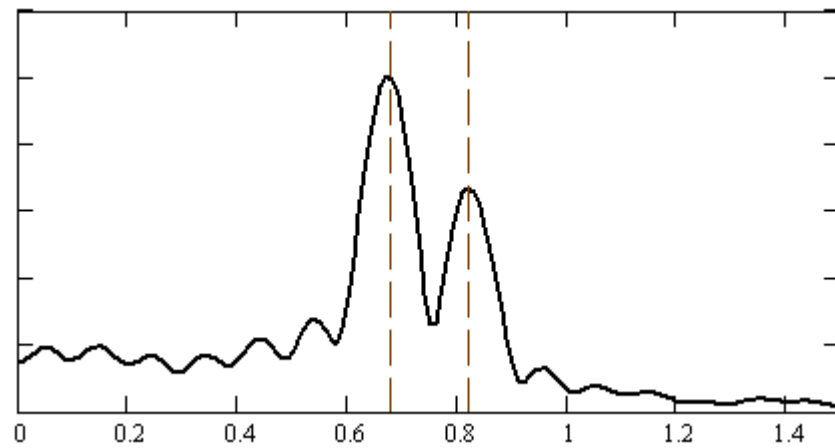
$$S(j\omega) = \pi \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^N \frac{x_{k,i}}{\sqrt{a}} \cdot e^{\left| \frac{-\omega}{\sqrt{a}} \right| - j\omega c_{k,i}}. \quad (9)$$

Следует отметить, что данная формула предполагает использование только положительных значений параметра a (для произвольных значений параметра формула получается слишком громоздкой и неудобной для использования), однако, т.к. функция имеет форму колокола именно при $a > 0$, то никаких дополнительных погрешностей при вычислении спектральной характеристики при использовании данного допущения не возникает.

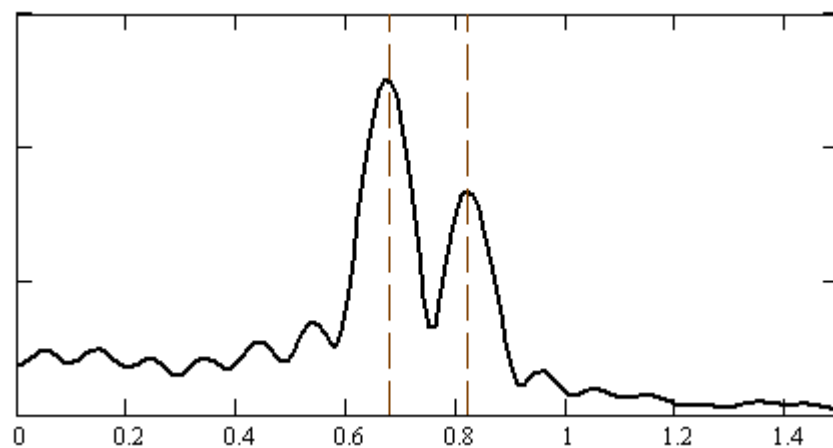
На рис. 4 показаны спектры мощности, вычисленные с помощью ДПФ и по формулам (8) и (9) для примера из раздела 1.



а)



б)



в)

Рис. 4. Спектральные характеристики: а - дискретное преобразование Фурье; б - спектр, вычисленный по формуле (8); в - спектр, вычисленный по формуле (9)

Вертикальными линиями отмечены положения частот составляющих исследуемого сигнала. Видно, что на рис. 4,б и 4,в пики спектра мощности соответствуют именно тем частотам, которые присутствуют в сигнале. ДПФ не позволило определить частоту второй гармоники $f_2 = 0.82 \text{ Гц}$, т.к. расстояние между частотами f_1 и f_2 практически совпадает с частотным разрешением. Предлагаемый же подход дает возможность выделить близко лежащие частоты за счет того, что теоретический спектр можно рассчитывать с любым шагом. В исследуемом случае шаг изменения частоты был уменьшен в 10 раз по сравнению с ДПФ. Заметим, что и с помощью ДПФ можно получить такую же картину, что и на рис. 4,б и 4,в путем добавления нулевых отсчетов и разрешения неопределенности. Однако в сложном сигнале для «хорошего» выделения необходимо, чтобы удлиненной таким образом реализации были кратны все составляющие, что практически недостижимо при исследовании реальных сигналов. В данном же способе кратность длины реализации не имеет значения.

Хорошо видно, что спектральные характеристики, вычисленные по формулам (8) и (9), практически не отличаются, несмотря на то, что погрешность аппроксимации анализируемого сигнала в первом случае значительно меньше, чем во втором.

Заключение

Преимуществом аппроксимативного спектрального анализа является более высокая разрешающая способность: выделение частотной составляющей не зависит от кратности периода этой составляющей периоду наблюдения (как это имеет место в ДПФ), что особенно важно при анализе коротких выборок данных. Данный подход может быть применен при выполнении время-частотного анализа сигналов, а именно при использовании кратковременного преобразования Фурье.

К достоинству аппроксимативного приближения многоэкстремальных функций можно отнести тот факт, что аппроксимация колокольными импульсами использует только существенную часть информации об исследуемом процессе, а именно значения экстремумов и их абсцисс, что приводит к появлению возможности сокращения объема хранимых данных.

Следует отметить также быстрое действие второго подхода к построению аппроксимирующего полинома: все сводится к выделению экстремумов и расчету параметров «колокольных» импульсов.

Список литературы

1. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл-мл.; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
2. Ерохин А.Т. Алгоритм аппроксимации экстремумов многоэкстремальных функций гауссовскими полиномами / А.Т. Ерохин,

Э.С. Кубанейшвили, В.Б. Лебедев // Методика измерения ускорения силы тяжести / ИФЗ, АН СССР. – М., 1973. – С. 81-96.

З. Мясникова Н. В. Аппроксимация многоэкстремальных функций и ее приложения в технических системах / Н.В. Мясникова, М.П. Берестень, М.П. Строганов // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – №2.

4. А.с. 1339456 (СССР). Аппроксимативный способ спектрального анализа / Е.П. Осадчий, М.П. Строганов, Н.В. Мясникова, А.Т. Ерохин, В.П. Шкодырев. – Бюл. №35, 1987. – 4 с.

УДК 681.51

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

С.К. Сперанский¹, В.Н. Лясников¹, К.С. Сперанский², А.А. Потапов³

¹СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

E-mail: fntm@sstu.ru, телефон +7-8452-99-86-23

²Акционерное предприятие «Автоматические линии связи»

E-mail: konstantin.speransky@yahoo.com

³Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
г. Москва, Россия

E-mail: potapov@cplire.ru

Описывается метод для адаптивного управления источником питания плазматрона на основе нейронных сетей, нечеткой логики и фрактальной геометрии. Приводится математическая модель фрактального временного ряда на основе функции Вейерштрасса-Мандельброта.

Ключевые слова: фракталы, нейронные сети, плазматрон, нечеткая логика.

INTELLIGENT CONTROL FOR PLASMA SPRAYING PROCESS WITH USING FRACTAL GEOMETRY

S.K. Speransky¹, V.N. Lasnikov¹, K.S. Speransky², A.A. Potapov³

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

²Joint venture «Lines for aAutomatic Connection»

³Institute of Radio Engineering and Electronics named for Kotelnikov V.A.,
Moscow, Russia

The article describes a method for adaptive power supply plasmatron based on neural networks, fuzzy logic and fractal geometry. Mathematical

model based on the Weierstrass-Mandelbrot function shows a fractal time series.

Keywords: fractals, neural networks, the plasma torch, fuzzy logic.

Низкотемпературную плазму можно получить при пропускании рабочего плазмообразующего газа через электрическую дугу в специальных генераторах плазмы - дуговых плазматронах. В промышленности плазматроны, как генераторы высокотемпературных газовых струй, используются для напыления покрытий. Материал покрытия при этом вводится извне и подвергается нагреву до пластического состояния. В качестве плазмообразующих газов часто применяют аргон, азот, водород, гелий и их смеси. В целом на процесс формирования покрытия при плазменном напылении влияют от 20 до 60 факторов. Исследование влияния различных факторов на такие основные показатели процесса напыления, как прочность сцепления и пористость покрытия, степень полезного использования материала, показали, что зависимости во многих случаях носят экстремальный характер. В связи с этим оптимизация процесса плазменного напыления представляет собой сложную задачу.

Широкое внедрение процессов напыления сдерживается низким техническим уровнем оборудования и практически полным отсутствием автоматизированного оборудования и качественных технологических процессов по нанесению газотермических покрытий [1]. В связи со сложностью физических процессов при плазменном напылении построить адекватную математическую модель процесса, отражающего физику явлений, фактически невозможно. Дуговой разряд в реальных условиях горения, в частности в плазматронах, находится под действием различных факторов: газового потока, магнитного поля - как внешнего, так и собственного. Всегда в реальных условиях поток газа в плазматроне с самого начала имеет значительную турбулентность, поэтому дуга начинает хаотически колебаться внутри канала. При этом участки столба дуги могут подходить очень близко к стенкам канала и замыкаться на них. Длина дуги при этом и соответственно общая мощность могут существенно изменяться. Если дугу обдувает турбулентный поток, дуга начинает хаотически колебаться под действием пульсаций скорости потока [2]. Столб дуги при этом приобретает причудливую форму и распадается на отдельные жгуты и сгустки, что показано на рис.1.

При этом меняются теплофизические характеристики газового потока напыляемого материала, что, естественно, вызывает изменение электрической проводимости газового потока и выражается в появлении колебаний напряжений в цепи питания плазматрона. Поставив в этой цепи датчик напряжения, можно оценить турбулентность плазменного потока: газа и напыляемых частиц. Определив влияние колебаний на качество и

структуру покрытия, можно, меняя входные параметры определенным образом, их улучшить.

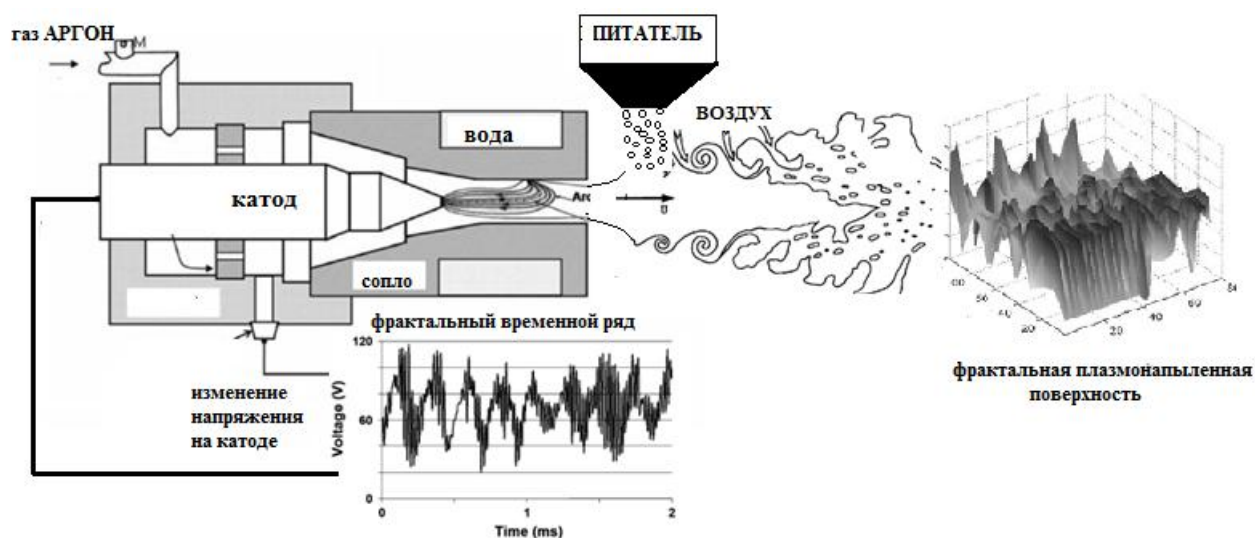


Рис. 1. Турбулентное нерегулярное течение плазменной струи и ее влияние на проводимость плазмы и качество покрытия

В таком вышеописанном технологическом процессе напыления целесообразно использовать искусственную нейронную сеть (рис. 2), которая не производит вычислений, а трансформирует входные сигналы управления (ток дуги, дисперсность порошка, дистанция напыления) в выходной образ (фрактальность катодного напряжения и нанесенного покрытия) в соответствии со своей топологией и значениями коэффициентов межнейронной связи.

Установка коэффициентов осуществлялась на примерах, сгруппированных в обучающие множества. Такое множество состояло из обучающих пар (200-250), в которых каждому эталонному значению входного образа соответствует желаемое (эталонное) значение выходного образа.

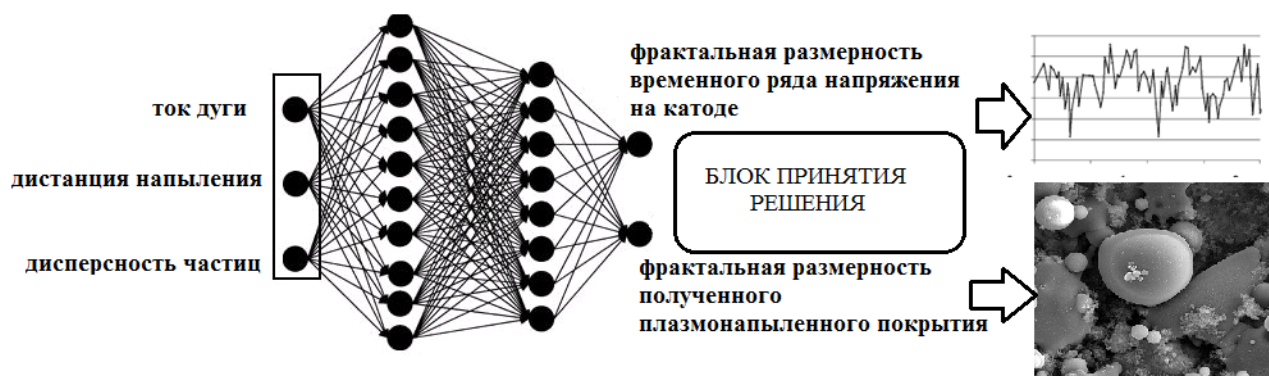


Рис. 2. Схема управления плазменным напылением с использованием нейросетевого подхода

Важная проблема в таких задачах возникает с формализацией неопределенностей, многочисленные источники которых имеют различную природу. В первую очередь к ним следует отнести погрешности вычислений и измерений, что приводит к возможности установления параметров текущего состояния объекта и его внешней среды только лишь с некоторой достоверностью. Одними из наиболее распространенных способов представления такой информации являются нечеткая логика и лингвистические переменные. В этом случае производится перевод четкой (числовой) информации в нечеткие логические переменные (фазификация).

Выходными параметрами (образами) для характеристики нелинейности использовали фрактальные временные ряды изменения напряжения на катоде и фрактальные плазмонапыленные покрытия [3]. Профили изменения напряжения получали с помощью запоминающего осциллографа, которые затем обрабатывались в среде Matlab. Алгоритм расчета осуществлялся следующим образом. Для измерения фрактальной размерности временного ряда изменения катодного напряжения вычисляли отношение $R_L(\delta) = L(\delta)/L'$, где L' - длина проекции профиля сигнала на плоскость, параллельную исследуемой фрактальной поверхности, а L - полная длина. Параметр $R_L(\delta)$ называли пульсацией и он связан с δ соотношением $R_L(\delta) = c_0 \delta^{(1-d)}$, где $c_0 = \text{const}$. Затем измерялся наклон $\ln R_L$ от $\ln \delta$, что адекватно определению фрактальной размерности.

Для сравнения в работе использовался и другой алгоритм для определения фрактальной размерности. Производилась аппроксимация исходного профиля ломаной линией, состоящей из отрезков некоторой заданной длины δ . По измерению числа отрезков $N(\delta)$, необходимых для аппроксимации профиля при определенном масштабе отрезков рассчитывали фрактальные размерности профиля D . При этом наклон определялся на прямолинейном участке обратной зависимостью $\ln N$ от $\ln \delta$:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} [\ln[N(\delta)] / \ln(1/\delta)].$$

Разные фрактальные образования могут иметь одинаковую размерность, но при этом резко отличающуюся текстуру. Это подтверждает то, что сама по себе фрактальная размерность не дает достаточно информации для описания и сегментации нелинейных текстур [4,5]. Для решения этой проблемы был введен термин «лакунарность» (заполнение) для описания таких графических объектов. В работе был использован признак заполнения z , в котором используется распределение вероятностей $P(m, L)$, того, что график находится внутри квадрата размером L , сосредоточенного вокруг произвольной точки графика изображения. Эта вероятность содержит усредненную информацию о распределении массы по фрактальному образованию:

$$Z = \frac{M^2(L) - [M(L)]^2}{[M(L)]^2},$$

где $M(L) = \sum_{m=1}^N mP(m, L)$, $M^2(L) = \sum_{m=1}^N m^2P(m, L)$.

С целью повышения информативности нами был использован метод определения фрактальной размерности экспериментальных данных с помощью вложения их в пространство подходящей размерности.

Фрактальная размерность оценивалась при простом сравнении экспериментального фрактального временного ряда с математической моделью. В качестве модели колебаний напряжения Амл(t) использовалась масштабно-инвариантная кривая фрактальной функции Вейерштрасса-Мандельброта:

$$\text{Амл}(t) = \frac{b^D}{\sqrt{b^{2D}-1}} \sum_{n=-20}^{20} \frac{\cos(2\pi b^n t_i) - 1}{b^{nD}},$$

где D - фрактальная размерность, которая принимает значение от 1 до 2. Эта функция непрерывна, но не дифференцируема ни в одной точке. Ее можно использовать для получения случайных фрактальных кривых, выбирая фазу из интервала $(0, 2\pi)$. При малых значениях D функция Амл(t) гладкая, но когда возрастает до 2, то начинает сильно флуктуировать и моделировать нелинейные колебания в электрической цепи плазматрона (рис. 3). Сравнивая эти колебания с реальными фрактальными временными колебаниями, можно найти фрактальную размерность временного ряда электрической цепи плазматрона.

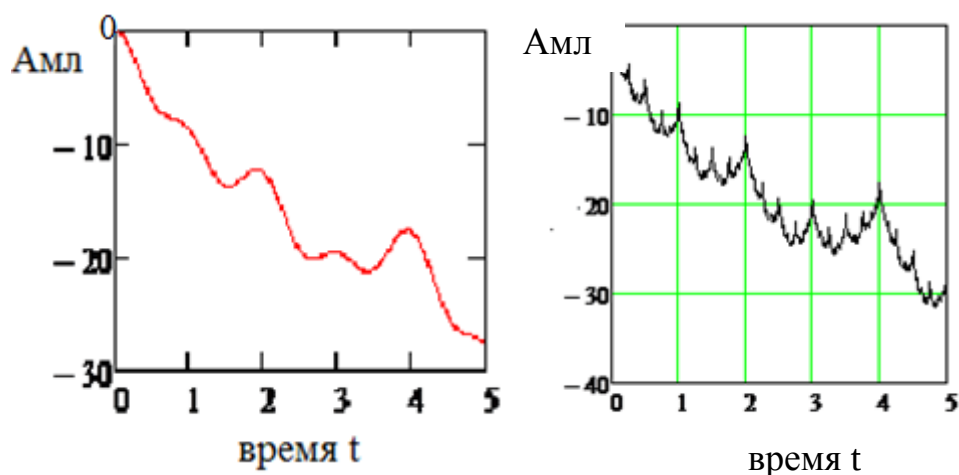


Рис. 3. Влияние параметра D на временную последовательность колебаний (слева $D=1,23$, справа $D=1,86$)

Плазмонапыленная поверхность также характеризуется фрактальной размерностью (рис. 4, а). Ее расчет производился с использованием специального программного обеспечения [6]. На фрактальных сигнатурах показано среднее значение фрактальной размерности D (рис. 4, в) при ее среднеквадратической величине σ . В режиме кластеризации, задавая

требуемый диапазон локальных фрактальных размерностей ΔD , на экране компьютера получаем поле фрактальных размерностей, для которых все значения $D_i \in \Delta D$ отображаются черным цветом (рис. 4, б).

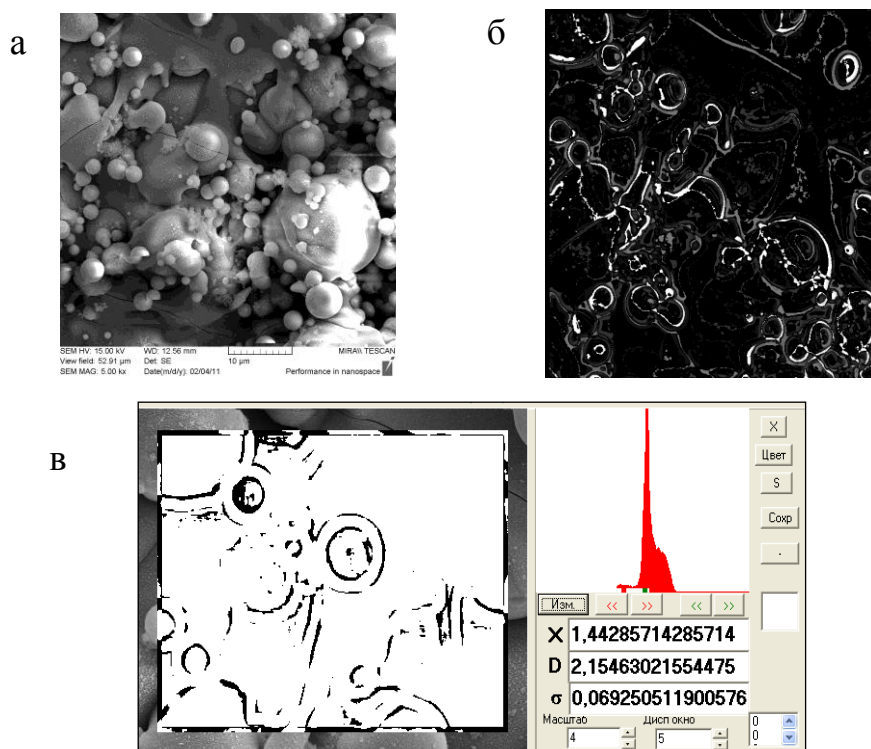


Рис. 4. Исходное изображение плазмонапыленного покрытия и его фрактальные параметры

Вывод. Сопоставляя фрактальную размерность выходных параметров с входными (ток, напряжение, давление плазмообразующего газа и т.д) и настраивая соответствующим образом нейронную сеть, можно получить плазмонапыленное покрытие со структурой и механическими параметрами, необходимыми для дальнейшего практического использования.

Список литературы

1. Лясников В.Н. Плазменное напыление в электронике и биомедицинской технике: учеб. пособие для студ. физ.-техн. спец. / В. Н. Лясников, Н. В. Протасова. – Саратов: СГТУ, 2010. – 285 с.
2. Кудинов В.В. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
3. Siegmann St. Scale-Sensitive Fractal Analysis for Understanding the Influence of Substrate Roughness in Thermal Spraying / St. Siegmann, C.A. Brown // *United Thermal Spray Conference* (ed. Berndt, C.C.) (ASM International, Materials Park, Ohio 44073-0002, USA, Indianapolis, USA, 1997).

4. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации / А.А. Потапов. – М.: Логос, 2002. – 664 с.

5. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки / А.А. Потапов. – Изд. 2-е, перераб. и доп.- М.: Университетская книга, 2005.– 848 с.

6. Новейшие методы обработки изображений / А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов и др.; под ред. А.А. Потапова.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.– 496 с.

УДК 621.892

ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛОСКИХ СТАНОЧНЫХ СТЫКОВ

А.Ф. Денисенко, Н.С. Назаров

СамГТУ, г. Самара, Россия

Тел. (8846) 3324585; E-mail ask@samgtu.ru

Рассмотрено моделирование термического сопротивления станочных стыков путем введения в тепловую модель узлов металлорежущего станка промежуточного слоя с коэффициентом теплопроводности, зависящим от качества поверхности соединяемых деталей. На основе численного моделирования оценено влияние технологических условий на теплопроводность контакта.

Ключевые слова: стык, тепловой поток, фактическая площадь контакта, термическое контактное сопротивление, коэффициент теплопроводности.

THERMAL RESISTANCE OF FLAT MACHINE JOINTS

A.F. Denisenko, N.S. Nazarov

Samara State Technical University, Samara, Russia

Modeling of thermal resistance of machine joints by introduction in thermal model of knots of the metal-cutting machine of an intermediate layer with the coefficient of heat conductivity depending on quality of a surface of connected details is considered. On the basis of numerical modeling influence of technological conditions on heat conductivity of contact is estimated.

Keywords: joint, thermal stream, actual area of contact, thermal contact resistance, heat conductivity coefficient.

Развитие современных металлорежущих станков связано с обильным выделением тепла в них. Это в первую очередь обусловлено расширением

технологических возможностей станков: увеличением мощности привода главного движения, расширением диапазонов частот вращения шпинделя и скоростей подачи, увеличением числа координат и соответственно количества электродвигателей и др. Всё это приводит к росту тепловыделения и температурных деформаций. В связи с этим погрешности от температурных деформаций могут составлять от 40 до 70% в общем балансе погрешностей металлообработки резанием.

Определение тепловых деформаций основных узлов станка, обеспечивающих формообразующие движения, и оценка изменения условий их функционирования при воздействии тепловых факторов осложняется рядом моментов.

Во-первых, это значительное число источников тепловыделения. Наряду с такими мощными, как электродвигатели и зона резания, имеются менее мощные, но более многочисленные и распределенные: подшипники качения и зубчатые передачи. Кроме того, выделение происходит в направляющих станков и передачах винт-гайка.

Во-вторых, конструкции узлов станка предполагают наличие в них большого числа деталей (валы, втулки, кольца, фланцы, гайки для фиксации опор и т.п.), каждая из которых контактирует с другими или имеет свободные поверхности, через которые может происходить теплообмен с окружающей средой.

Учитывая, что узлы станков, как правило, объединены отдельными корпусами, то это создает возможность многовариантного распространения тепловых потоков внутри узла, их деления и сложения.

Таким образом, разработка аналитической модели, позволяющей прогнозировать тепловые процессы в узлах металлорежущих станков, требует существенных допущений, которые не только не позволяют оценить влияние особенностей конструкции, но и полностью исключают учет влияния технологического фактора (качество изготовления и сборки).

В связи с этим, реальным путем решения указанных задач является использование численного моделирования с использованием современных программных пакетов, например ANSYS.

Использование конечно-элементного моделирования для оценки тепловых процессов в узлах, состоящих из нескольких элементов (деталей), соединенных между собой тем или иным образом, дает возможность создать тепловую модель, учитывающую теплопроводности материалов этих деталей.

Однако основные термические сопротивления возникают не в самих деталях, а в соединениях этих деталей. Это обусловлено в первую очередь

несовершенством контакта в соединении: существенным отличием фактической площади контакта от номинальной.

В связи с этим предлагается при разработке тепловых моделей узлов станков моделировать узлы в виде пространственного объема, контуры которого ограничены наружными поверхностями узла, заполненного деталями с теплопроводностью их материалов, объемами псевдослоев в зонах контакта с теплопроводностью, определяемой условиями контакта, и объемами, которые являются «пустотами» в конструкции узла, с теплопроводностью воздуха или масла.

Основной трудностью при использовании такой тепловой модели является определение толщины псевдослоев и их теплопроводности.

Это связано с тем, что любая реальная поверхность представляет собой комбинацию выступов и впадин, размер и форма которых зависят от способа обработки. Таким образом, при контактировании двух поверхностей образуется фактическая площадь контакта, существенно меньшая номинальной, состоящая из отдельных пятен контакта, которые при наличии волнистости или макронеровностей концентрируются в определённых областях, что создает дополнительное тепловое сопротивление.

Имея в виду, что при определении фактической площади контакта необходимо наряду с учетом шероховатости и волнистости учитывать и макроотклонения, то при выборе толщины псевдослоя следует ориентироваться на величины максимальных зазоров, возникающих при начальном контакте (рис. 1), и размеры конечных элементов, используемых при разработке КЭ модели.

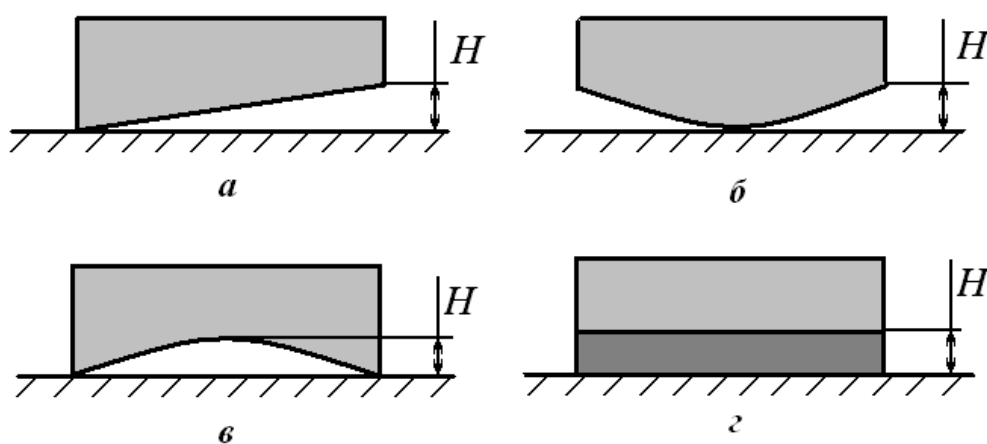


Рис. 1. Максимальные величины зазоров при начальном контакте (а, б, в) и принятая толщина псевдослоя (г)

Современные возможности вычислительной техники позволяют численными методами определить коэффициент теплопроводности псевдослая путем КЭ моделирования процесса теплопередачи от одной поверхности к другой с учетом расположения и размеров пятен контакта, высоты неровностей контактных поверхностей, материала в зоне контакта.

Для иллюстрации возможностей современного программного обеспечения и оценки влияния технологических факторов был рассмотрен плоский стык двух тел цилиндрической формы, теплообмен в котором осуществлялся по зонам фактического контакта, которые моделировались в виде четырех пятен круговой формы диаметром d , центры которых расположены на одной окружности диаметра D . На наружных поверхностях тел 1 и 2 (кроме поверхностей стыка) учитывалась конвекция. Тепловой поток мощностью $q = 100$ Вт был направлен на верхнюю поверхность тела 1. Результат распространения теплового потока через тело 1, контакт тел 1 и 2 и тело 2 контролировался в точках I и II.

Моделировались следующие случаи осесимметричной задачи:

1) изменялось значение D при сохранении диаметра d , то есть $\eta = \text{const}$, где $\eta = S_\phi / S_H$ – параметр относительной площади контакта, определяемый отношением фактической площади контакта S_ϕ к номинальной S_H ;

2) изменялось значение d при сохранении диаметра $D = 50$ мм (рис. 2).

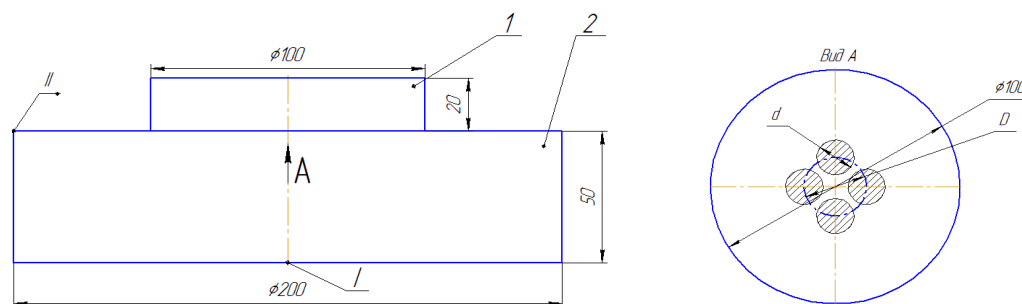


Рис. 2. Расчетная модель для исследования теплопроводности стыка

Результаты численного эксперимента, представленные на рис. 3, показывают, что изменение температуры в обеих точках (I и II) зависит от D : для точки I имеет место незначительный экстремум, а для точки II – постепенный рост, связанный с приближением пятен фактического контакта к точке II. Характер изменения температуры в точках I и II при учете конвекции практически не меняется, но ее значения существенно снижаются за счет рассеивания тепла с поверхностей деталей 1 и 2. Причем с увеличением времени количество отданного за счет конвекции тепла увеличивается: если при 30 мин оно составляет около 6%, то при 60 мин – уже около 15%.

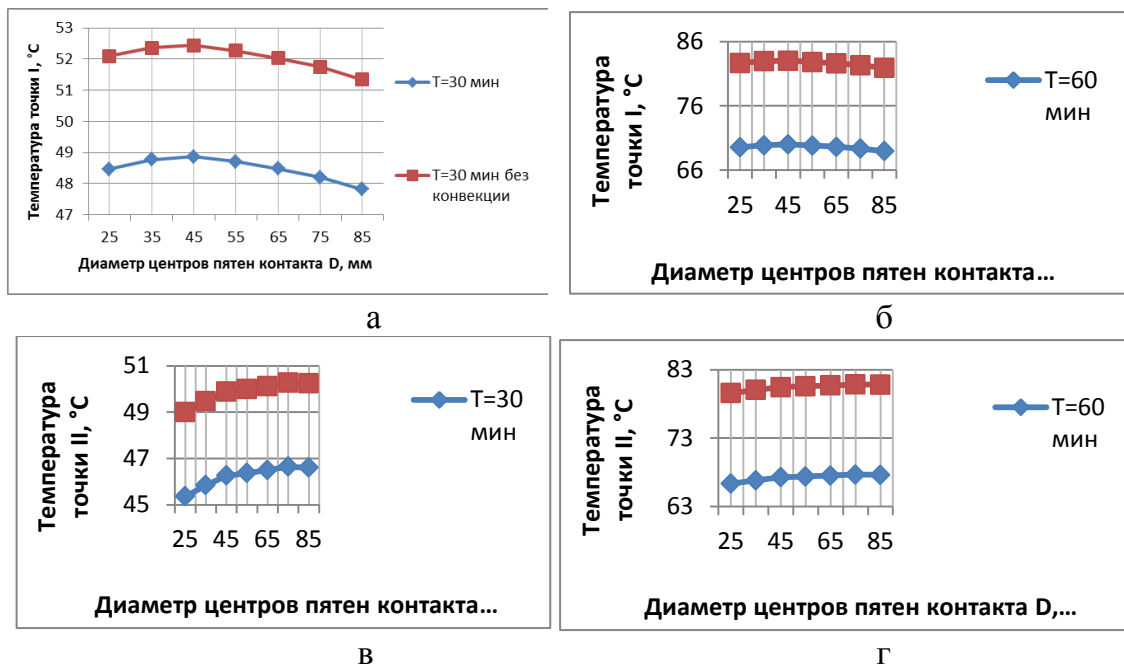


Рис. 3. Изменение температуры точки I (а, б) и точки II (в, г) с изменением местоположения пятен контакта ($d = 15$ мм)

Увеличение площади фактического контакта приводит к незначительному увеличению температуры в точках I и II при изменении $d = 15 \dots 30$ мм, а при $d = 30 \dots 45$ мм происходит её стабилизация (рис. 4). Учет конвекции при изменении фактической площади контакта не меняет качественную картину изменения температуры в точках I и II, однако уменьшает ее величину на $3 \dots 4^\circ$ (при $T=30$ мин) и $13 \dots 14^\circ$ (при $T=60$ мин).

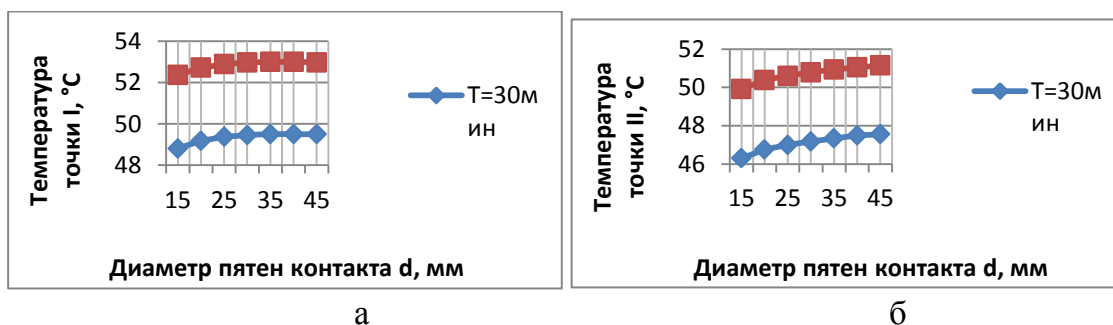


Рис. 4. Изменение температуры точки I (а) и точки II (б) с изменением размеров пятен

Кроме необходимости учета площади фактического контакта, т.е. коэффициента η , при определении теплопроводности контактного псевдослоя следует учесть теплопроводность промежуточной среды, заполняющей микрополости между сопрягаемыми телами. И хотя основной тепловой поток стремится проходить через места фактического контакта, часть его, проходящая вне зон фактического контакта, будет

определяться величиной этого зазора и теплопроводностью среды, его заполняющей [1]. В соединениях деталей станка средой, заполняющей возможный зазор, являются воздух, масло, загрязнения или продукты износа.

Учет наличия промежуточной среды моделировался путем рассмотрения теплопроводности соединения в виде двух плоскостей, имеющих цилиндрические выступы высотой $0,5H$, соответствующие местам фактического контакта. Для упрощения модели принималось, что все площадки фактического контакта расположены в одной плоскости - плоскости контакта. Промежуточная среда высотой H (тело 3) (рис. 5) ограничена цилиндрическими выступами и размерами номинальной поверхности. Показания температур фиксировались в четырёх точках: I и II детали 2, III и IV детали 1 (рис. 5). Рассматривался один из случаев расположения пятен контакта $d=15$ мм и $D=25$ мм. На верхнюю поверхность тела 1 прикладывался тепловой поток мощностью $q=100$ Вт. На наружных поверхностях всех тел учитывалась конвекция с коэффициентом теплоотдачи $\alpha=6$ ккал/м²·ч·°С. Рассматривались пять временных интервалов: 5, 15, 30, 60, 120 мин. Величина зазора H определялась в соответствии с возможной шероховатостью контактирующих поверхностей и задавалась в восьми вариантах: 0,4, 0,2, 0,1, 0,05, 0,025, 0,0126, 0,0064, 0,0032 мм.

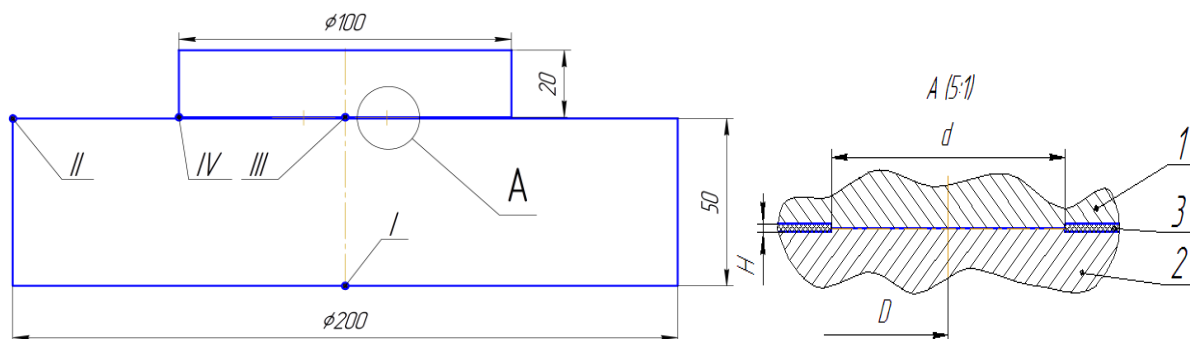
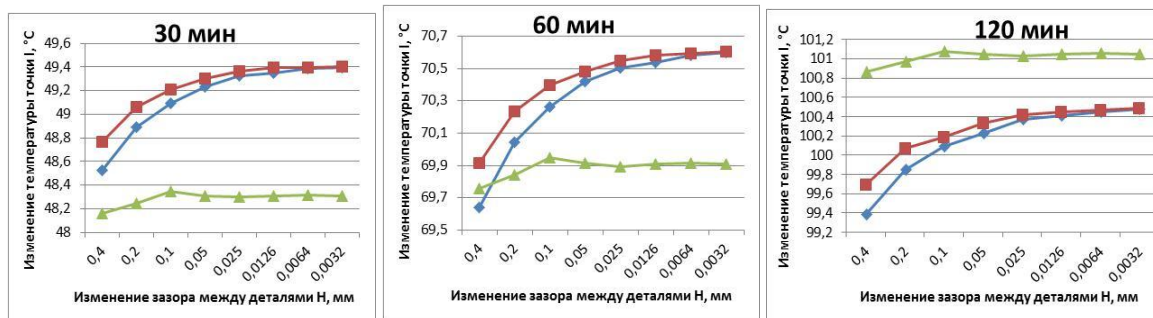


Рис. 5. Расчётная модель для исследования теплопроводности стыка

Моделировались следующие случаи:

- 1) тело 3 отсутствует, то есть тепловой поток идет только через пятна фактического контакта;
- 2) тело 3 принимается как воздух;
- 3) тело 3 принимается как масло с параметрами $\rho=903$ кг/м³, $\lambda=0,1485$ Вт/(м·К), $c_0=1,712$ кДж/(кг·К), где ρ – плотность, λ – теплопроводность, c_0 – удельная теплоёмкость масла [2].

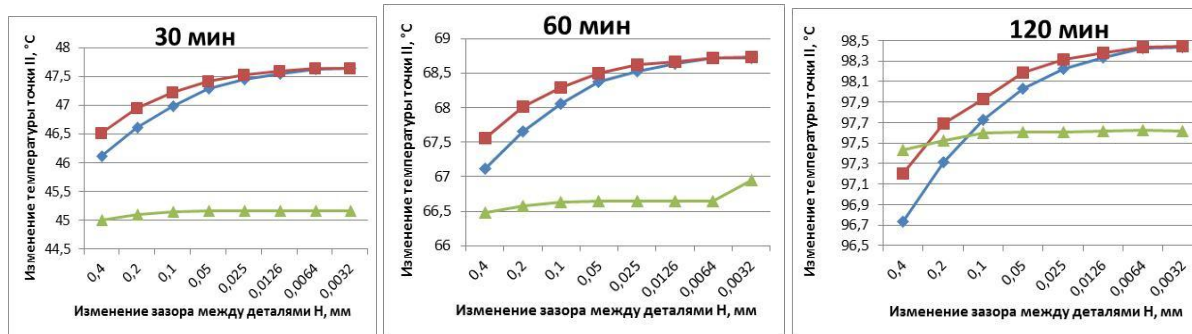
Результаты численного моделирования представлены графиками на рис. 6 и 7.



а

б

в



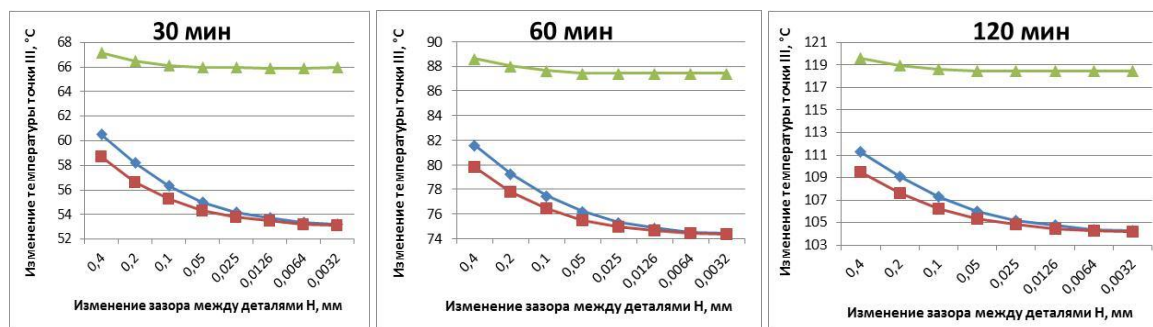
г

д

ж

Рис. 6. Изменение температуры точек I (а, б, в) и II (г, д, ж) в зависимости от зазора в контакте:

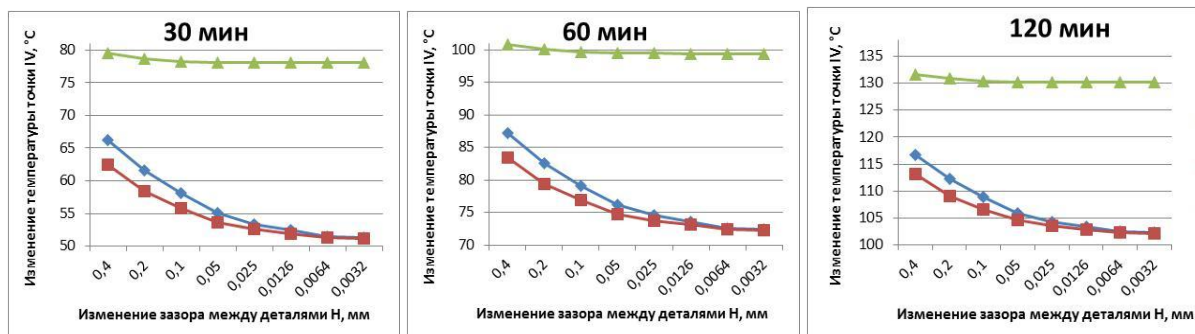
— тело 3 - масло; — тело 3 - воздух; — тело 3 - отсутствует



а

б

в



г

д

ж

Рис. 7. Изменение температуры точек III (а, б, в) и IV (г, д, ж) в зависимости от зазора в контакте при отсутствии тела 4:

— тело 3 - масло; — тело 3 - воздух; — тело 3 - отсутствует

1) Данные первого эксперимента показывают, что температура при уменьшении зазора практически не меняется, а незначительные изменения можно объяснить перестроением геометрии модели и соответственно изменением конечно-элементной сетки.

2) Данные второго эксперимента показывают, что наличие воздушной среды в зазоре приводит к увеличению теплового потока через соединение, в связи с чем изменение зазора нелинейно влияет на температуру в контролируемых точках. Чем меньше воздушный зазор, тем больше теплопроводность соединения. Таким образом, с уменьшением зазора в контакте температура детали 2 увеличивается, а температура детали 1 уменьшается.

3) Результаты третьего эксперимента показывают, что замена среды в зазоре (воздух на масло) практически не сказывается на характере изменения температуры. Заметное влияние теплопроводности зазора наблюдается только при значительных его величинах (0,025...0,4 мм).

Выводы

При разработке тепловых моделей узлов станков предлагается моделировать станочные соединения путем введения в тепловую модель узлов металлорежущего станка промежуточного слоя с коэффициентом теплопроводности, зависящим от качества поверхности соединяемых деталей.

Проведённое численное моделирование показало, что величина теплопроводности контакта зависит от качества обработки контактирующих деталей, температуры в контакте и мало зависит от материала во впадинах микро - и макронеровностей.

Список литературы

1. Денисенко А.Ф. Контактное термическое сопротивление станочных соединений / А.Ф. Денисенко, А.Ю. Новиков // Актуальные проблемы трибологии: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2007.– С. 177-185.

2. Авчугов В. В. Задачник по процессам тепломассообмена / В.В. Авчугов, Б.Я. Паюсте. – М.: Энергоатомиздат, 1986. –144 с.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКИХ АНТЕНН ОСЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В РАДИОДИАПАЗОНЕ СВЧ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ОБОСНОВАНИЕ**

С.А. Парпула, В.П. Заярный, В.С. Гирич

ВолгГТУ, г. Волгоград, Россия

Тел. 8 (988) 399-83-15; E-mail parpula@yandex.ru,

Тел. 8 (937) 530-25-21; E-mail Zvp2000@mail.ru,

Тел. 8 (917) 846-25-41; E-mail Vlad_net77@mail.ru.

Получены математические модели для плоских антенн осевого излучения СВЧ-диапазона с линейно расширяющимся раскрывом, для расчета их диаграммы направленности в зависимости от конфигурации раскрыва. Экспериментально измерены диаграммы направленности для аналогичных антенн, установлено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Выявлены закономерности влияния конфигурации раскрыва исследуемых антенн на форму главного лепестка их диаграмм направленности, что является важным для оптимизации электродинамических характеристик антенных решеток на их основе.

Ключевые слова: диаграмма направленности, основной лепесток, антенна, антенная решетка, раскрыв, электродинамические характеристики.

**MODELING ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE
PLANAR ANTENNA IN THE RADIO AXIAL RADIATION
IN MICROWAVE AND EXPERIMENTAL BASIS**

S. A. Parpula, V.P. Zayarny, V.S. Girich

VSTU, Volgograd, Russia

The mathematical model for planar antennas axial radiation - microwave with linearly expanding aperture, to calculate their pattern depending on the configuration of the aperture. Experimentally measured radiation patterns for similar antennas, set a good agreement between the calculated and experimental results. The regularities of the influence of the configuration investigated aperture antennas on the shape of the main lobe of their patterns, which is important to optimize the dynamic characteristics of antenna arrays based on them.

Keywords: directional pattern, main lobe, antenna, array, antenna aperture, electrodynamics characteristics.

Антенны и антенные устройства в радиотехнических системах являются важнейшим функциональным звеном, характеристики которого во многом определяют характеристики остальных функциональных блоков системы. В связи с этим разработка и исследование характеристик новых антенн и антенных устройств на их основе (в том числе СВЧ-диапазона) представляют повышенный интерес и являются актуальными. Следует отметить важность разработки адекватных математических моделей для разрабатываемых антенн, подтвержденных получаемыми экспериментальными данными, позволяющих рассчитывать и прогнозировать их важнейшие характеристики, что также является востребованным и актуальным.

В данной работе исследуются плоские антенны, выполненные в виде симметричных щелей с линейно расширяющимся выходом (раскрывом), вырезанных в металлических пластинах с высокой проводимостью (медь, алюминий), толщиной порядка 0,3 мм, без диэлектрической подложки, которые предполагается использовать в составе дисковых антенных решеток.

Для расчета диаграмм направленности (ДН) плоских симметричных антенн, у которых изменение поперечного сечения раскрыва является линейным, произведем регуляризацию для конечного числа участков так, что каждый из них представлял собой щель постоянной ширины, и по их суммарному вкладу в дальней зоне поля рассчитаем ДН всей антенны. Для подобной ступенчатой аппроксимации нерегулярной структуры поле в дальней зоне можно найти по формуле [1-3]:

$$E_{\theta}(\theta, \varphi) = \frac{j\omega\epsilon w \cdot \sin \varphi \cdot e^{-jk_0 r}}{4\pi^2 r} \int_{-w/2}^{w/2} \frac{e^{jk_0 z' \cos \theta}}{\sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 - z'^2}} dz' \times$$

$$\times \int_0^L e^{jk_0 x' \sin \theta \cos \varphi} \cdot e^{k_x x'} \cdot \left[1 + e^{j\frac{\pi}{4}} F\left(v \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}\right) + \frac{\sqrt{2} e^{-j\frac{\pi}{4}}}{\pi} \frac{e^{-j\frac{\pi}{2} v^2}}{v} \right] dx'.$$

Здесь $E(\theta, \varphi)$ – вклад в поле дальней зоны; θ, φ – угловые координаты в Е - и Н – плоскостях ДН; w – ширина n – го регулярного участка волноведущей структуры; r – расстояние до рассматриваемой точки пространства; x, z – оси координат;

$$F(v) = \int_0^v e^{-jt^2} dt \quad - \text{интеграл Френеля};$$

$$v = \sqrt{\frac{2k_0 x' \sin \theta (1 + \cos \phi)}{\pi}} ;$$

ω – частота электромагнитных колебаний на входе антенны; k_0 – волновое число; j – мнимая единица; t – время.

Расчеты ДН производились для антенн, имевших длину L в пределах $(1 \div 5\lambda)$ и ширину раскрыва H в пределах $(1 \div 3\lambda)$ мм, на частоте 10 ГГц, для E -плоскости электромагнитных колебаний [4, 5]. На рис. 1 приведена диаграмма направленности, полученная в результате моделирования с использованием приведенных выше формул для случая $L = 150$ мм и $H = 60$ мм. Видно, что ширина ДН по уровню половинной мощности составляет порядка 30° , а уровень боковых лепестков (УБЛ) имеет значение порядка 0,05 от мощности излучения непосредственно перед антенной (при $\theta=0$).

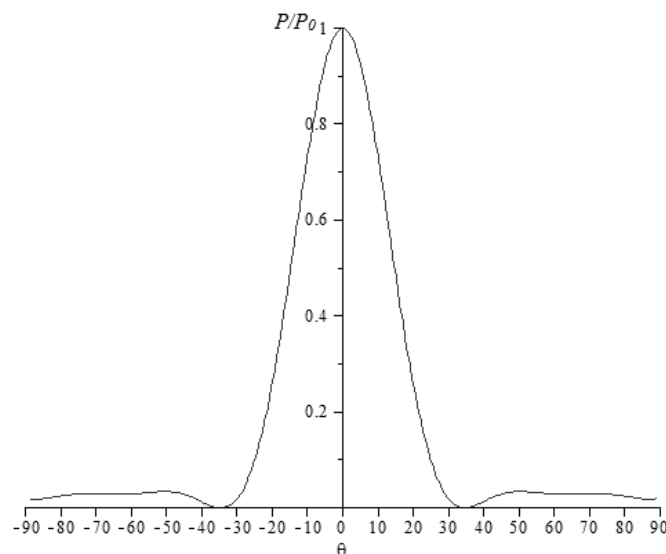


Рис. 1. Диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $H = 60$ мм

В качестве проверки адекватности полученных результатов также производилось построение ДН для одного регулярного участка (с $n=0$). Эти ДН сравнивались с экспериментально полученными результатами для регулярной антенны в [2, 4]. Сравнительный анализ опытных данных и результатов моделирования показал, что имевшие при этом место расхождения ДН были незначительными. Наилучшим образом результаты совпадают в случае, когда значение $\Delta w = \lambda_0/8$. Это свидетельствует об адекватности полученных модельных представлений и возможности их использования для моделирования ДН подобных антенн с любыми

параметрами, а также ДН более сложных антенных систем (например, антенных решеток) на их основе.

Расчет ДН исследуемой антенны при изменении ширины раскрыва (размера H , при постоянной длине $L = 5 \lambda = 150$ мм) в большую ($H = 3\lambda = 90$ мм) и меньшую ($H = 1\lambda = 30$ мм) сторону показал следующее. При увеличении размера антенны H главный лепесток ДН существенно сужается, а ее ширина по уровню половинной мощности составляет порядка 20° . При уменьшении размера H , главный лепесток ДН существенно расширяется, а ее ширина по уровню половинной мощности составляет порядка 46° . При увеличении ее размера H , УБЛ возрастает, но не превышает уровня 0,1 от максимальной мощности излучения (рис. 2, 3).

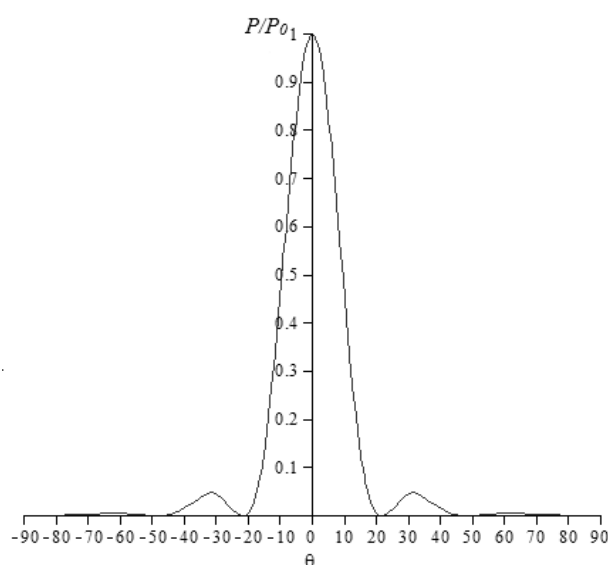


Рис. 2. Диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $H = 90$ мм

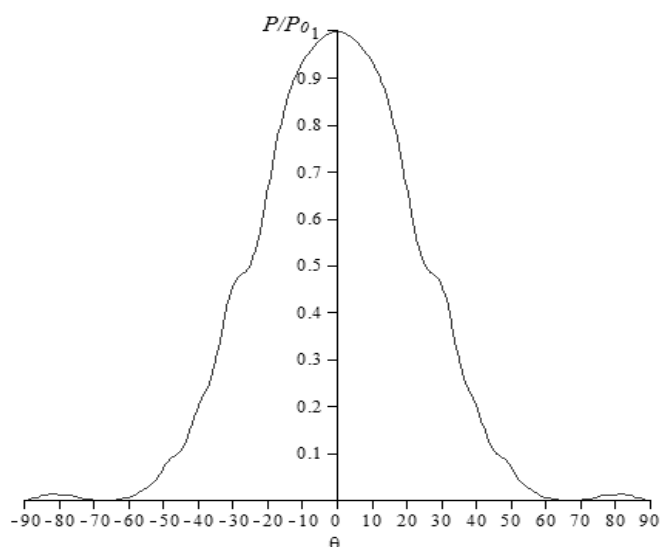


Рис. 3. Диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $H = 30$ мм

Из полученных расчетных данных видно, что имеется явная зависимость ширины главного лепестка ДН исследуемых плоских симметричных антенн с линейно изменяющимся раскрывом от угла раскрыва (размера H). Это позволяет использовать данные разновидности антенн в качестве базовых элементов в более сложных антенных системах, таких как дисковые антенные решетки [5], для улучшения и оптимизации их электродинамических характеристик. Полученные модельные представления позволяют прогнозировать и оптимизировать геометрические размеры базовых элементов для тех или иных антенных систем на основе исследуемых [6, 7].

В ходе численного эксперимента, описанного выше, исследовались антенны, у которых изменялась ширина раскрыва H в пределах $(1 \div 3\lambda)$ на частоте 10 ГГц для E -плоскости электромагнитных колебаний. Для проведения натурного эксперимента был сконструирован набор антенн, у которых также при длине антенны L , равной 150 мм (5λ), ширина раскрыва H изменялась в пределах $(1 \div 3\lambda)$. Проектирование антенн с учетом их электродинамических свойств производилось с учетом основных положений, изложенных в [8 – 10], измерение их диаграмм направленности производилось на установке, описанной в [11, 12].

На рис. 4 – 6 представлены диаграммы направленности в E – и H - плоскостях с шириной раскрыва $H=30$ мм (1λ), 60 мм (2λ) и 90 мм (3λ), соответственно. Длина антенны во всех случаях была одинаковой ($L = 150$ мм).

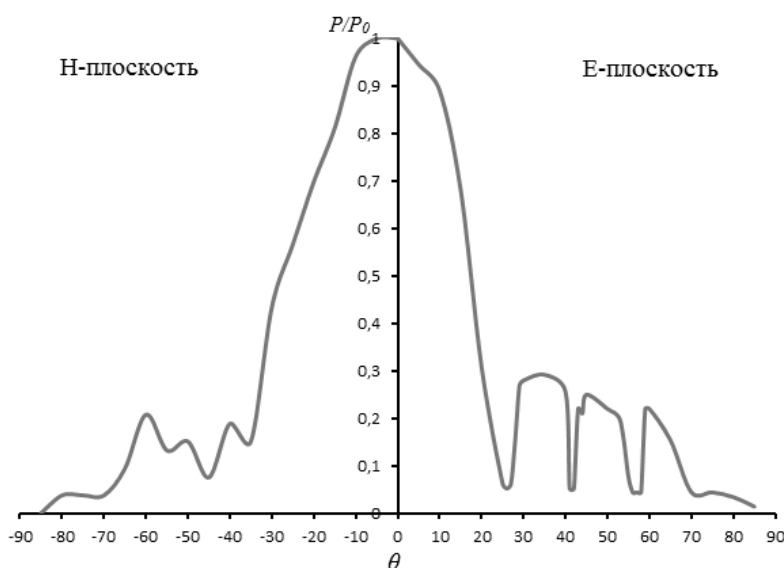


Рис. 4. Диаграмма направленности для случая $L = 150$ мм, $H = 30$ мм

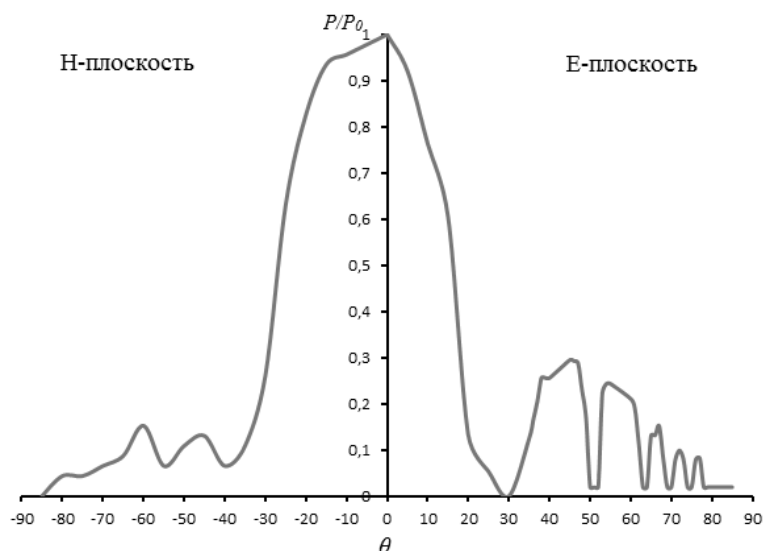


Рис. 5. Диаграмма направленности для случая $L = 150$ мм, $H = 60$ мм

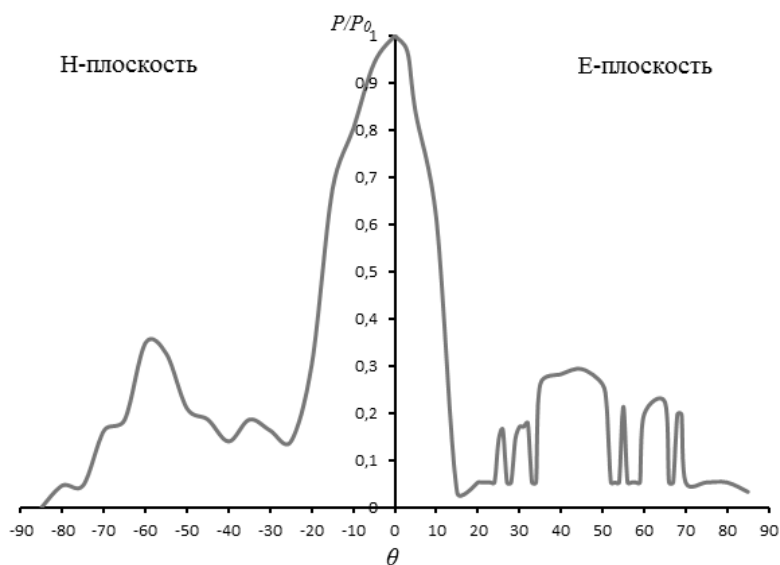


Рис. 6. Диаграмма направленности для случая $L = 150$ мм, $H = 90$ мм

Измерение приведенных ДН производилось на частоте 10 ГГц. Их форма сохранялась практически неизменной в диапазоне частот 5,9 – 12,5 ГГц.

Из анализа экспериментально измеренных ДН видно, что при увеличении раскрыва антенны их главный лепесток, как и в случае расчетных ДН (для E – плоскости), сужается. При этом ширина экспериментально полученных ДН по половинной мощности составляла порядка 48° - в случае $H = 30$ мм (1λ), 32° - в случае $H = 60$ мм (2λ) и 20° - в случае $H = 90$ мм (3λ), что хорошо согласуется с результатами расчета. Уровень боковых лепестков у экспериментально полученных ДН несколько выше, чем у расчетных, и не превышал 0,3 от максимальной мощности.

Из графиков рис. 4 – 6 также видно, что в H – плоскости ДН имеет место та же закономерность сужения главных лепестков, что и в E – плоскости. Однако в H – плоскости главные лепестки ДН несколько шире, чем в E – плоскости (для одних и тех же значений раскрыва антенн), и имели значения порядка 58° - в случае $H = 30$ мм (1λ), 54° - в случае $H = 60$ мм (2λ) и 38° - в случае $H = 90$ мм (3λ). При этом имеет место тенденция к увеличению УБЛ при увеличении раскрыва антенны, так же, как в случае расчетных ДН.

Сравнивая результаты, полученные с использованием представленной выше модели, и экспериментальные данные, легко заметить, что эксперимент согласуется с теоретическим расчетом.

Из полученных расчетных и экспериментальных результатов видно, что имеется явная зависимость ширины главного лепестка ДН исследуемых плоских симметричных антенн с линейно изменяющимся раскрывом от угла раскрыва (размера H). Это позволяет использовать данные разновидности антенн в качестве базовых элементов в более сложных антенных системах, таких как дисковые антенные решетки [7], для улучшения и оптимизации их электродинамических характеристик. Полученные модельные представления позволяют заранее рассчитывать оптимальные геометрические размеры базовых элементов для соответствующих антенных систем.

Список литературы

1. Janaswamy R. Analysis of the transverse electromagnetic mode linearly tapered slot antenna / R. Janaswamy, D. H. Schaubert, D.M. Pozar // Radio Science. – Vol. 21. – P. 797–804.
2. Фролов А. А. Изучение электродинамических характеристик антенн и антенных систем СВЧ-диапазона / А.А. Фролов, С. В. Гирич, В. П. Заярный // Известия вузов. Радиофизика. – 2009. – Т. 52. – №4. – С. 328 - 335.
3. Фролов А. А. Изучение электродинамических характеристик плоских коротких антенн и антенных решеток СВЧ-диапазона / А. А. Фролов, С. В. Гирич, В. П. Заярный // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. – Т. 11. – № 4. – С. 33-39.
4. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго; пер. с франц. под ред. К. С. Шифрина. – М.: Наука, 1965. – 780 с.
5. Уолтер К. Антенны бегущей волны / К. Уолтер; пер. с англ. под ред. А. Ф. Чаплина. – М.: Энергия, 1970. – 448 с.
6. Tai C. T. Dyadic Grin's Functions in Electromagnetic Theory chap. 10. Intext, Scranton, Pa., 1971.

7. Дискровая антенна кругового обзора на симметричных щелевых излучателях / А.А. Фролов, С.В. Гирич, В.С. Гирич и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Т. 15. – № 4. – С. 84-87.

8. Неганов В. А. Линейная макроскопическая электродинамика: в 2 т. / В.А. Неганов, С.В. Раевский, Г.П. Яровой; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радио и связь, 2000. – Т. 1. – 509 с.

9. Неганов В.А. Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн: учеб. пособие для вузов/ В. А. Неганов, Е. И. Нефёдов, Г. П. Яровой; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радио и связь, 2002. – 416 с.

10. Неганов В.А. Полосково–щелевые структуры сверх– и крайневых частот / В.А. Неганов, Е.И. Нефедов, Г.П. Яровой. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 304 с.

11. Заярный В.П. Радиофизические свойства твердотельных слоистых структур с зарядовой связью: методы и информационные возможности для их определения / В.П. Заярный. – М.: Радио и связь, 2001. – 212 с.

12. Фролов А.А. Информационно-управляющая система для измерения характеристик антенн СВЧ - диапазона / А. А. Фролов, С. В. Гирич, В. П. Заярный // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2008. – Вып. 2. – С. 77 - 80.

УДК 629.113.004.67

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ, ПРОХОДЯЩИХ В ТОПЛИВНОМ НАСОСЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

И.К. Данилов, А.В. Марусин, А.М. Сычёв
СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия
(Тел: +7 906 300 8020; E-mail: danilov@sstu.ru)

По математической модели в форме нелинейного дифференциального уравнения исследуется влияние коэффициентов сжимаемости и динамической вязкости дизельного топлива на изменения давления в надплунжерной области плунжерной пары топливного насоса высокого давления с замкнутым выходом от угла поворота распределительного вала.

Ключевые слова: плунжерная пара, коэффициент сжимаемости, коэффициент динамической вязкости, топливный насос высокого давления, дизель, моделирование процессов.

MATHEMATICAL MODELS OF PROCESSES TAKING PLACE IN HIGH PRESSURE FUEL PUMP AUTOMOTIVE DIESEL

I. K. Danilov, A. V. Marusin, A.M. Sichev
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

On mathematical model in the form of the nonlinear differential equation agency of compressibility factors and a diesel fuel dynamic viscosity on pressure modifications in field over a plunger of a plunger pair of a fuel pump of a high pressure with the closed exit from a camshaft angle of rotation is examined.

Keywords: plunger pair, a compressibility factor, dynamic viscosity coefficient, a high pressure fuel pump, the diesel engine, model operation of processes.

Анализ материалов известной многочисленной отечественной и зарубежной научно-технической литературы по математическому моделированию процессов в системе топливоподачи дизелей с электронным управлением [1–4] показал, что в дифференциальных уравнениях, описывающих процессы каждого из элементов математической модели системы топливоподачи, используется большое количество параметров, существенно влияющих на качественную динамику изменения мгновенных значений давлений дизельного топлива.

В материалах статей не рассматриваются вопросы оценки степени количественного влияния параметров математических моделей, показатели и функции чувствительности изменения параметров математических моделей на результаты моделирования, отсутствуют чёткие рекомендации по оценкам степени чувствительности и значимости каждого из параметров математических моделей топливной аппаратуры в отдельности.

В математических моделях процессов плунжерного топливного насоса высокого давления (ТНВД) также имеется много параметров, существенно и взаимно влияющих на результаты моделирования.

Наши предварительные исследования математических моделей процессов плунжерной пары ТНВД показали очень высокое влияние на результаты моделирования следующих параметров модели ТНВД: коэффициента сжимаемости дизельного топлива, коэффициента кинематической вязкости дизельного топлива, величины зазоров в плунжерной паре, скорости движения плунжера, изменения объёма над плунжером и пр.

В этой связи были сформулированы следующие задачи теоретического исследования: количественно оценить влияние значений следующих параметров математической модели плунжерной пары ТНВД: коэффициента сжимаемости, коэффициента кинематической вязкости

дизельного топлива, величин зазоров в плунжерной паре, изменения скорости движения плунжера, изменения объёма над плунжером на результаты моделирования процессов в ТНВД.

Для исключения влияния процессов в других элементах системы топливоподачи дизеля целесообразно рассматривать процессы плунжерной пары ТНВД в отдельности. Поэтому на первом этапе исследования рассматривается только один из элементов математической модели системы топливоподачи дизеля: собственно математическая модель одной плунжерной пары ТНВД, выход которой закрыт. Поэтому развиваемая производительность плунжерной пары ТНВД – подача дизельного топлива переходит в утечки по щели между втулкой и плунжером.

Использовались следующие допущения при моделировании процессов в отдельно взятой плунжерной паре с закрытым выходом ТНВД: вся подача плунжерной пары соответствовала утечкам по зазору между плунжером и втулкой; значения коэффициента динамической вязкости и сжимаемости изменяются с ростом давления топлива над плунжером; не учитывается перепад давлений в нагнетательном клапане насоса, вследствие малости его по сравнению с давлениями, создающимися в системе топливоподачи при впрыске.

Учитывая коэффициент сжимаемости топлива, дифференциальное уравнение, описывающее процесс изменения давления над плунжером насоса высокого давления, имеет вид [1]:

$$\alpha_m(p) \cdot V_p(\varphi) \cdot dp/dt = f_p \cdot c_p + Q_{pH}, \quad (1)$$

где α_m – коэффициент сжимаемости топлива; V_p – объём полости над плунжером; f_p и c_p – площадь сечения и мгновенная скорость плунжера насоса; p – давление топлива над плунжером; t – время; Q_{pH} – объёмный расход утечек через щель плунжер–втулка ТНВД.

В исследовании использовалась табличная экспериментальная зависимость истинного и среднего значений коэффициентов сжимаемости топлива от начального давления p [1], которая в форме графиков приведена на рис.1.

По табличным данным [1] построены следующие регрессионные математические зависимости:

– значений среднего коэффициента сжимаемости дизельного топлива (α_{cp}) от начального давления (p_p) в форме многочлена четвёртого порядка:

$$\alpha_{cp} = a_1 \cdot p^4 + a_2 \cdot p^3 + a_3 \cdot p^2 + a_4 \cdot p + a_5, \quad (2)$$

где $a_1 = 5,1569 \cdot 10^{-6}$; $a_2 = -8,3799 \cdot 10^{-4}$; $a_3 = 0,0531$; $a_4 = -1,9148$; $a_5 = 100,06$;

– значений истинного коэффициента сжимаемости дизельного топлива ($\alpha_{ист}$) от начального давления над плунжером (p_p) в форме многочлена пятого порядка:

$$\alpha_{\text{ист}} = a_1 \cdot p^5 + a_2 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_4 \cdot p^2 + a_5 \cdot p + a_6, \quad (3)$$

где $a_1 = -7,5712 \cdot 10^{-8}$; $a_2 = 1,4734 \cdot 10^{-5}$; $a_3 = -0,0014$; $a_4 = -2,9671$; $a_5 = 0,0825$; $a_6 = 99,997$.

При расчетах процесса подачи в дифференциальные уравнения математической модели процессов обычно вводится истинный коэффициент сжимаемости дизельного топлива.

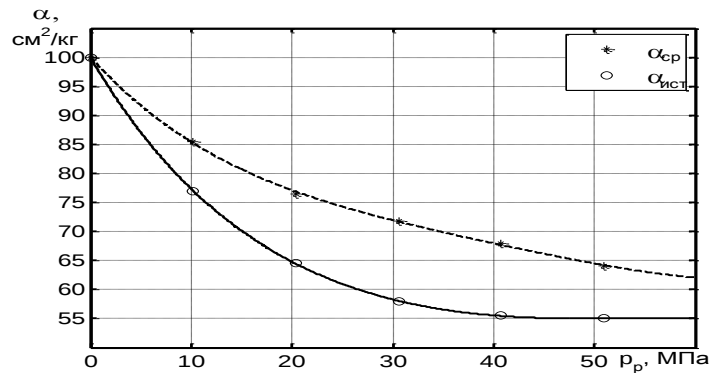


Рис.1. Зависимость коэффициента сжимаемости дизельного топлива от начального давления p : $\alpha_{\text{ист}}$ - значения истинного коэффициента сжимаемости; α_{cp} - средние значения коэффициента сжимаемости

Исследования по моделированию процессов в плунжерной паре с закрытым выходом ТНВД проводились для конструкции дизельного плунжерного топливного насоса высокого давления с электромагнитным клапаном производства ООО «ППП Дизельавтоматика».

Значения скорости (v_p) и ускорения (a_p) плунжера рассчитывались численным дифференцированием интерполяционной табличной зависимости перемещения плунжера (h_p) по углу поворота распределительного валика ТНВД (ϕ).

При расчёте относительных значений перемещения (h_p), скорости (v_p) и ускорения (a_p) плунжера были использованы их максимальные значения соответственно $h_{p\max} = 0,022$ м при $\phi = 56^\circ$ п.р.в.; $v_{p\max} = 2,017$ м/с при $\phi = 23^\circ$ п.р.в.; $a_{p\max} = 0,383$ м/с² при $\phi = 19^\circ$ п.р.в.

Уравнение объёмного расхода топлива в зазоре по сопряжению плунжер-втулка ТНВД имеет следующий вид [1]:

$$Q_{pH} = \pi \cdot \beta_s \cdot \Delta p^2 \cdot \delta^3 \cdot d \cdot \ln(c_\mu) / (12 p_0 \cdot \delta \cdot \mu_{t0} \cdot l \cdot (c_\mu^{\Delta p/p_0} - 1)) \pm (\pi \cdot u \cdot d \cdot \delta / 2), \quad (4)$$

где δ – величина кольцевого зазора; u – скорость плунжера ТНВД; d и l – соответственно диаметр и длина втулки; β_s – поправочный коэффициент на эксцентricность сопряжения (от 1,15 до 1,4); $\Delta p = p_p - p_0$ – перепад давлений в уплотнении; $c_\mu = 1,0025$ – коэффициент с постоянным значением; μ_{t0} – динамическая вязкость топлива при атмосферном давлении $p_0 = 0,1$ МПа.

В уравнении (4) учитывается уравнение изменения коэффициента динамической вязкости μ_{tr} от давления p_p над плунжером ТНВД [1]:

$$\mu_{\text{тр}} = \mu_{\text{то}} \cdot c_{\mu}^{p/p_0} \quad (5)$$

Известны различные зависимости коэффициента кинематической вязкости топлива от температуры. Коэффициенты динамической ($\mu_{\text{тр}}$) и кинематической (ν) вязкости дизельного топлива связаны между собой по следующему выражению:

$$\nu = \mu_{\text{тр}} / \rho_{\text{т}}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{т}}$ – плотность дизельного топлива.

По табличным данным экспериментальной зависимости кинематической вязкости (ν) дизельного топлива от его температуры ($T_{\text{т}}$) [3] построена соответствующая ей регрессионная зависимость, которая имеет следующий вид:

$$\nu_p = a + c \cdot \log(T) + d \cdot \log(T)^2, \quad (7)$$

где $a = 0,76149543$; $c = -0,36487040$; $d = 0,043988593$; ν_p – расчётная кинематическая вязкость дизельного топлива.

При моделировании процессов в ТНВД использовалась экспериментальная табличная зависимость значений перемещения плунжера (h_p) ТНВД от угла поворота (ϕ) распределительного вала дизеля 16ЧН26/26, которая для относительных значений перемещения плунжера приведена в форме графика на рис. 2. Интерполяция табличной зависимости перемещения плунжера от угла поворота распределительного вала (ϕ) была получена с использованием численного метода вычислительной математики - кубической сплайн-интерполяции.

Регрессионная зависимость (7) кинематической вязкости (ν) дизельного топлива от его температуры ($T_{\text{т}}$) в форме графика приведена на рис. 3.

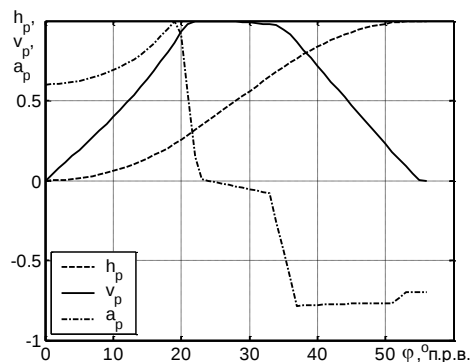


Рис. 2. Зависимость относительных экспериментальных значений перемещения (h_p) и расчётных значений скорости (v_p) и ускорения (a_p) плунжера ТНВД от угла поворота кулачкового вала дизеля 16ЧН26/26

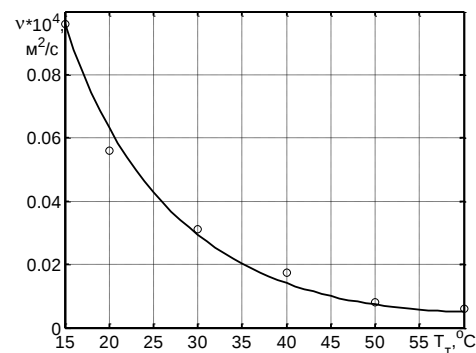


Рис. 3. Зависимость кинематической вязкости (ν) дизельного топлива от его температуры ($T_{\text{т}}$): $\circ$ – данные эксперимента; — – расчёт по регрессионной модели

По представленным уравнениям процессов в плунжерной паре ТНВД с закрытым выходом построена структурная схема её обобщенной математической модели, которая отражена на рис. 4 в форме элементов среды визуального графического программирования Simulink.

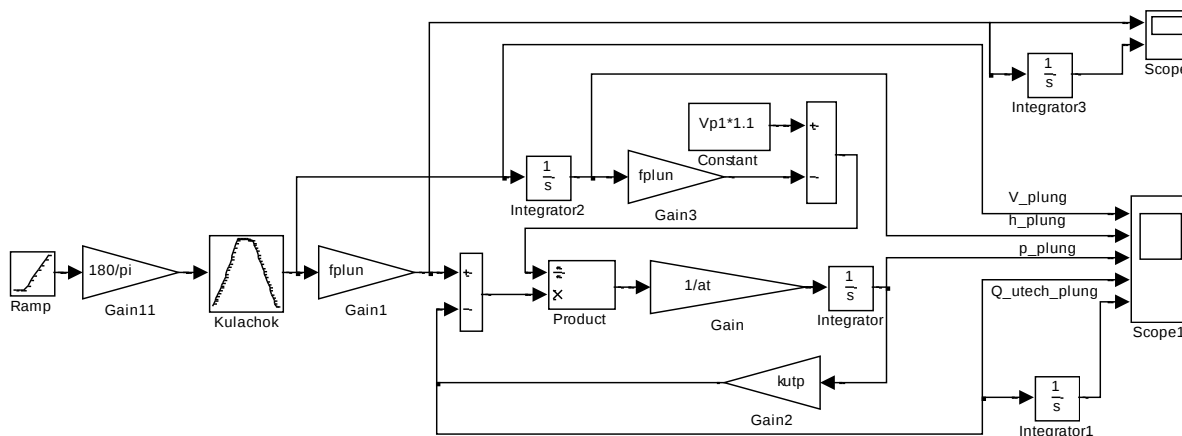


Рис. 4. Структурная схема математической модели ТНВД (прикладная программа Simulink)

Интегрирование рассматриваемой математической модели процессов в плунжерной паре ТНВД производилось численным методом вычислительной математики – математическим методом численного интегрирования «жёстких» дифференциальных уравнений с обыкновенными производными третьего порядка.

Список литературы

1. Двигатели внутреннего сгорания: Системы двигателей внутреннего сгорания / под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
2. Грехов Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с.
3. Файнлейб Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: справочник / Б.Н. Файнлейб. – Л.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
4. Ahlin K. Modelling of pressure waves in the Common Rail Diesel Injection System / K. Ahlin // LinkAoping, December 11, 2000. – 57 p.
5. Tran X.T. Modelling and simulation of electronically controlled diesel injectors/ X.T. Tran. – Sydney, Australia, 2003. – 155 p.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ СО СЛОЖНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Е.П. Решетникова

Научный руководитель профессор П.Ю. Бочкарев
СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия
Тел. 8-927-124-53-21; E-mail purpose22@mail.ru

Рассмотрены современные проблемы автоматизации контроля деталей со сложными поверхностями на координатно-измерительных машинах. Предложена классификация поверхностей с позиции измерения по различным признакам. Обосновано использование кластерного анализа для создания универсальной методики контроля.

Ключевые слова: автоматизация процесса измерения, сложные поверхности, координатно-измерительные машины, кластерный анализ.

AUTOMATION OF MEASUREMENT PROCESS OF DETAILS WITH COMPLEX SURFACES IN MECHANICAL ENGINEERING

E.P. Reshetnikova

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

Modern problems of automation of the control of details with complex surfaces by coordinate-measuring machines are considered. Classification of surfaces from a position of measurement to various attributes is offered. Use the cluster analysis for creation of a universal technique of the control is proved.

Keywords: automation of process of measurement, complex surfaces, coordinate - measuring machines, the cluster analysis.

Измерение традиционно считается одной из фундаментальных задач науки и техники. Достаточно вспомнить крылатое выражение Д.И. Менделеева: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немислима без меры». Это утверждение во многом заложило основы метрологии и не потеряло актуальности в настоящее время.

Ключевыми предпосылками для проведения настоящих исследований явились: во-первых, пересмотр идеологии нормирования геометрических характеристик изделий (ГОСТ Р 53442-2009, ISO 12181-1:2011) и, во-вторых, широкое внедрение новых измерительных приборов, например, координатно-измерительных машин (КИМ), оснащенных возможностями сканирования. Это дает основания для пересмотра традиционных подходов на основе допускового контроля или аппроксимации поверхностей и развития методов глобального контроля сложных поверхностей на деталях [1-3].

В настоящее время при контроле с использованием КИМ на первый план выходит проблема автоматизации измерений для повышения производительности процесса. Поэтому цель исследований – разработка информационной технологии измерения сложных поверхностей, позволяющей с заданной точностью и максимальной производительностью контролировать сложные поверхности деталей машиностроения.

Объектами изучения являются детали со сложными поверхностями, в группу таких деталей входят детали типа тел вращения, детали со сложнопрофильными поверхностями, также в отдельную группу сложных поверхностей нужно выделить детали зубчатых передач, которые отличаются многообразием (цилиндрические с прямыми, винтовыми, шевронными зубьями, конические с прямыми и криволинейными зубьями, гипоидные, червячные). Сложность исследуемой проблемы обусловлена, с одной стороны, разнообразием видов сложных поверхностей и их возможным сочетанием на одной детали. Контроль параметров таких деталей является неотъемлемой частью технологического процесса изготовления, т.е. необходимо установить целесообразность контроля – как наиболее подходящую методику сбора информации, так и средства, с помощью которого будет осуществляться контроль.

В настоящее время известные производители мобильных КИМ рекомендуют использовать минимальное число точек, необходимое для однозначной идентификации поверхности. Например, достаточно трех точек для плоскости или шести точек для цилиндра. Строгое научное обоснование подобных рекомендаций отсутствует. Поэтому необходимо проведение экспериментальных исследований для выявления закономерности погрешности измерения от числа точек при контроле различных видов поверхностей.

Методика координатных измерений включает в себя стратегию измерений (рекомендуемое число точек, их расположение на контролируемых поверхностях и последовательность обхода (траектория движения)) и набор расчетных моделей, математически описывающих взаимосвязь координат измеренных точек с определяемыми параметрами. Методика измерений осуществляется с помощью программного обеспечения, используемого в каждой конкретной КИМ. Анализ известного программного обеспечения для мобильных КИМ показал, что отсутствуют универсальная методика, подходящая для различных типов КИМ, и полная база данных по сложным поверхностям. Поэтому целесообразна разработка универсальной методики, адаптированной для различных типов КИМ.

Для автоматизации процесса сбора и обработки результатов измерений и для создания универсальной методики измерения необходимо создание определенной классификации поверхностей измерения. Данная классификация была создана с применением аппарата кластерного анализа.

Кластерный анализ представляет собой способ группировки многомерных объектов, основанный на представлении результатов точками геометрического пространства с последующим выделением групп кластеров (англ. cluster – гроздь, сгусток, пучок). Данный метод исследования получил развитие в последние годы в связи с возможностью компьютерной обработки больших баз данных. Основной вопрос, решаемый на первом этапе: как организовать данные в наглядные структуры, т.е. развернуть кластеры. Чем выше уровень агрегации, тем меньше сходства между отдельными объектами в соответствующем классе.

Применение кластерного анализа предполагает следующие этапы:

- отбор выборки для кластеризации;
- определение переменных, по которым будут оцениваться объекты в выборке;
- вычисление значений той или иной меры сходства (или различия) между объектами;
- применение метода кластерного анализа для создания групп сходных объектов;
- проверка достоверности результатов кластерного решения.

Все поверхности были разделены по сложности контроля на 9 типов, из которых 2 типа разделены еще на 2 подтипа. Предложено 8 классификационных признаков. Принадлежность к тому или иному признаку задана с помощью 0 и 1. Результаты сведены в таблицу 1.

Кластерный анализ выполняется для трех вариантов контроля, а именно:

- по базовой поверхности (поверхность детали выполняет роль базы для измерений);
- по контролируемой поверхности (поверхность на детали, у которой контролируются размеры и отклонения формы поверхности);
- по взаимосвязанным поверхностям (несколько поверхностей на детали, для которых определяют не только размеры и отклонения формы, но и взаимное расположение).

Типы поверхностей, которые анализируются: плоскость, цилиндрическая, коническая, сферическая, тороидальная, винтовая (линейчатая, нелинейчатая, круговая), тело вращения, тело протягивания (шлицевой вал, шпоночный паз), цилиндрическое зубчатое колесо (с прямыми и винтовыми зубьями).

В качестве дополнительных признаков для классификации выделены следующие: контролируемые параметры (размеры, форма, расположение поверхностей, комплексный контроль), тип нормируемых показателей (допусковый контроль, стандартные показатели, дополнительные показатели, глобальный контроль).

Таблица 1. Классификация поверхностей с помощью кластерного анализа

Базовые поверхности																		
Наименование поверхности		Показатели поверхности детали для контроля параметров детали																
		Min число измер. точек для определения размера			Число парам. оп. ред. раз-ры поверх.			Требования по располож. измер. точек		Наличие повторяющ. элементов	Число станд. парам. нормир. откл. форм			Наличие частных показ.	Возмож. контроля по сечениям	Нахождение повер. на детали		Результативность контроля части поверх.
		3	4	> 4	1	2	> 3	равном	неравн.		0	1	>1			Закрытая	Открытая	
Плоскость		1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1
Цилиндрическая		0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0
Коническая		0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0
Сферическая		0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1
Торондальная		0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0
Винтовая	Линейчатая	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0
	Нелинейчатая	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0
Тело вращения		0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0
Тело протягивания		0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0
Цилиндрическое колесо	С прямыми зубьями	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0
	С винтовыми зубьями	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0

Таким образом, была предложена классификация поверхностей для автоматизации процессов обработки данных результатов измерений с применением аппарата кластерного анализа. Это позволит в дальнейшем сформировать универсальную методику контроля при различных сочетаниях поверхностей на деталях.

Список литературы

1. Осипович Д. А. Выбор метода оцифровки для контроля геометрии крупногабаритных сложнопрофильных деталей и узлов авиационных двигателей / Д. А. Осипович, С. Г. Ярушин // Молодой ученый. – 2014. – № 1. – С. 103-110.
2. Сурков И. В. Применение КИМ для контроля линейно-угловых параметров и зубчатых колес / И.В. Сурков, М.В. Мягкова // Контроль и диагностика. – 2007. – № 5. – С. 86-89.
3. Прямицин И. Б. Лазерные сканирующие устройства. Методы и методики исследования характеристик. Области применения / И. Б. Прямицин, И. Б. Челпанов // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2012. – № 2. – С. 631-644.
4. Суслин В. П. Новый метод определения геометрических параметров объектов при измерениях на малых областях / В. П. Суслин, А. В. Джунковский, М. Г. Шутер // Законодательная и прикладная метрология. – 2008. – № 6. – С. 39-42.
5. Мандель И. Д. Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
6. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014612744. Расчет отклонений от круглости деталей / П. Ю. Бочкарев, О. В. Захаров, В. В. Шалунов, Е. П. Решетникова. Опубл. 6.03.2014.

УДК 658.512

РАЦИОНАЛЬНАЯ ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАНОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Ю.Л. Чигиринский, И.В. Фирсов

*Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград, Россия, Тел. 844-224-84-38;*

E-mail Julio-Tchigirinsky@yandex.ru; techmash@vstu.ru

Обоснована логическая структура информационного обеспечения для формализованного проектирования планов механической обработки простых поверхностей заданного качества и точности. Показано, что

традиционно применяемые в технологическом проектировании таблицы точности обработки обеспечивают возможность формализации проектных задач средствами теории множеств. Предложенная логическая структура – вероятностная таблица точности – позволяет применить для генерации маршрута обработки алгоритмы дискретной математики. Обоснована возможность структурной оптимизации последовательности механической обработки по вероятностному критерию надежности технологического проекта.

Ключевые слова: маршрутное проектирование, план обработки, качество обработки, точность обработки, справочные данные, вероятностная таблица точности, матрица смежности, структурная оптимизация, целевая функция.

RATIONAL LOGICAL DATABASE MODEL FOR FORMALIZATION DESIGNING ROUTE MACHINING

Ju. L. Tchigirinsky, I. V. Firsov

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Substantiated the logical databases structure for formalized designing routes machining of elementary surfaces specified quality. It is shown, that the tables of machining accuracy, which traditionally used in process design, provide the opportunity to formalize objectives of project by means of set theory. The proposed logical structure – the probabilistic table of machining accuracy, – allows the application the algorithms of discrete mathematics for generate route machining. Are justified the possibility of structural optimization of route machining. The probabilistic assessment of reliability of technological project is proposed to use as an optimization criterion.

Keywords: designing of routes, route of machining, machining quality, machining accuracy, reference data, probabilistic table accuracy, adjacency matrix, structure optimization, criterion function.

Технологическое проектирование представляет собой циклическую итерационную последовательность [7] дискретных, в достаточной степени самостоятельных и завершенных во времени, проектных процедур. Основная сложность автоматизации процесса технологического проектирования состоит в отдаленности по времени двух проектных процедур: принятия решения на этапе маршрутного проектирования и комплексной проверки корректности принятых решений, которая выполняется, как правило, на завершающем этапе цикла проектирования. От корректности инженерных решений, полученных на начальных стадиях (выбор методов и последовательности обработки поверхностей и смены баз), зависит необходимость выполнения всех последующих проектных процедур, представляющих собой так называемые «формализованные» проектные задачи, на решение которых ориентированы большинство

промышленно применяемых технологических САПР [5]. В качестве причин слабой формализованности задач маршрутного проектирования мы обосновывали [4, 7] недостаточную полноту и неоднозначность нормативно-справочной информации, применяемой в маршрутном технологическом проектировании.

Задача проектирования технологии механической обработки всегда сводится к проблеме формирования заданной точности и качества изделия. Качество и точность обработанной поверхности оцениваются комплексом показателей, каждый из которых можно рассматривать как параметр технологического метода (табл. 1), с помощью которого получено определенное состояние поверхности изделия. Традиционно применяемые при проектировании информационные массивы – таблицы точности – допускают формализованный выбор технологических методов, обеспечивающих требуемое состояние обработанной поверхности. В данном случае речь идет только о последнем переходе в технологической цепочке.

Таблица 1. Точность и качество обработки наружных цилиндрических поверхностей

Технологический метод	IT				Ra			
	Min	Max	Средн.	Размах	Min	Max	Средн.	Размах
1. Точение обдирочное	12	13	12,5	1,0	12,50	40	26,25	27,50
2. Точение полуступовое	10	12	11,0	2,0	4	12,50	8,25	8,50
3. Точение однократное	10	12	11,0	1,0	2	12,25	7,22	10,25
4. Шлифование полуступовое	8	9	8,5	1,0	1,25	3,20	2,22	1,95
5. Точение чистовое	7	9	8,0	2,0	1,6	3,20	2,40	1,60

Предлагаемый подход к построению плана механической обработки поверхности базируется на представлении технологических показателей в виде случайных величин. Последовательность обработки формируется таким образом [4, 6, 9], чтобы каждый последующий технологический переход существенно улучшал показатели качества и точности изделия.

Решение задачи формализации и последующей алгоритмизации проектирования планов обработки проводится в два этапа: во-первых, оценка возможного повышения достоверности справочных данных и, во-вторых, разработка информационной структуры для формализованного проектирования. Вопросы, связанные с количественной оценкой достоверности (или, иначе говоря, однозначности, однородности), подробный перечень рассмотренных справочных данных и методики анализа, позволившие сделать подобное заключение, приведены ранее в наших работах, например [4]. Решение задачи построения статистически достоверных массивов технологических допусков методов механической обработки оформлено в виде методики статистического анализа (рис. 1) нормативно-справочной информации.

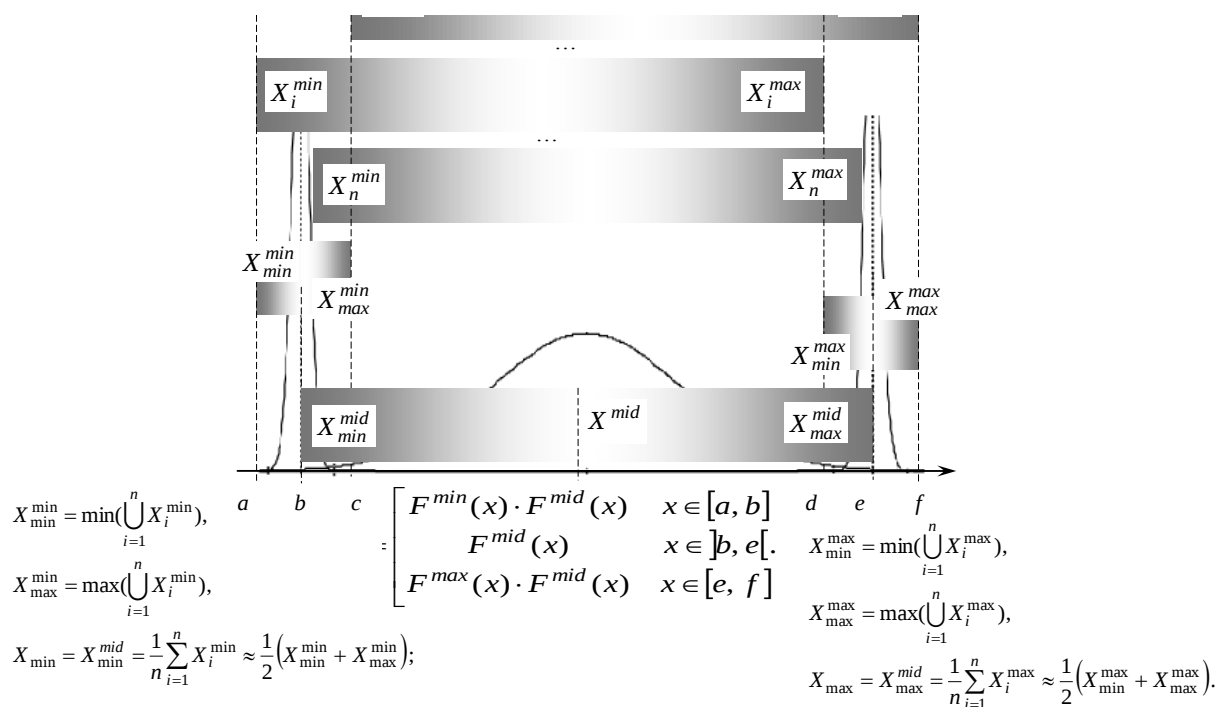


Рис. 1. Схема построения обобщенных технологических допусков метода обработки

Аналогичный подход используется нами и для анализа технологических возможностей реального производства. Методика (рис. 1) реализована в виде программы [2] для построения (рис. 2) обобщенных таблиц точности обработки.

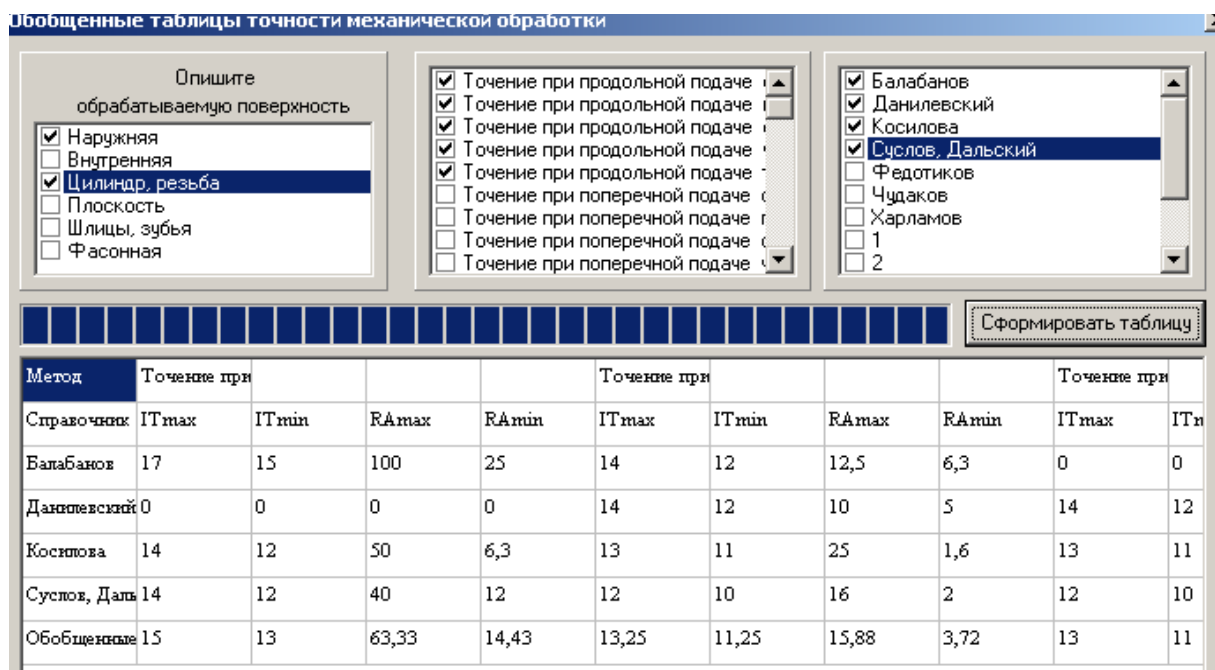


Рис. 2. Программа построения обобщенных таблиц точности (рабочее окно)

Для решения второй проблемы необходимо разработать такую структуру и тип данных, которые позволили бы проследить и однозначно определить взаимосвязь последовательности технологических переходов с результатами реализации этой последовательности. Причем результаты

выполнения плана обработки должны выражаться количественно в величинах критериев точности и качества изделия, во-первых, и оцениваться с точки зрения достоверности, во-вторых. Фактически, для построения последовательности обработки поверхности необходимо подобрать в таблицах точности «смежные» методы обработки, количественные характеристики которых существенно отличаются. В качестве критерия существенного различия мы используем коэффициент вариации [4, 6] разности средних значений случайных величин, соответствующих показателям качества обработки «смежных» технологических переходов. Достоверность на каждом этапе технологического маршрута, равно как и надежность плана обработки в целом, оценивается с помощью интегральной функции принадлежности [3, 8]. В первом приближении технологические методы можно считать сходными при значении коэффициента вариации менее 0,17 [4, 6]. Следует отметить, что каждая пара методов обработки характеризуется собственной величиной изменения показателей точности и качества обработки. Организация данных в виде обычной «плоской» таблицы не позволяет отразить в информационном массиве эти особенности. В качестве основы для построения логической модели справочника применим так называемые «матрицы смежности», используемые для описания сетей и графов в дискретной математике. В отличие от классических матриц смежности, содержащих данные логического типа и определяющих только факт смежности соседних вершин графа, в предлагаемой структуре (рис. 3) отметим значения величин изменения показателя качества обработки – выше главной диагонали – и вероятностные оценки достоверности изменения – ниже главной диагонали.



Рис. 3. Программа построения обобщенных таблиц точности (рабочее окно)

Величина изменения показателя качества рассчитывается (1) в зависимости от характера [6] соответствующей случайной величины.

$$\Delta X_{ij} = \begin{cases} \overline{X}_i - \overline{X}_j & , \text{ дискретная} \\ \overline{X}_i / \overline{X}_j & , \text{ непрерывная} \end{cases} \quad (1)$$

Существенность изменения значения показателя определяется (2) соотношением (V_{ij}) средних значений показателя до ($\overline{X}_i$) и после ($\overline{X}_j$) выполнения технологического перехода и суммарной погрешностью – стандартным отклонением S_{ij} – технологического показателя на выполняемом и предыдущем переходах.

$$V = \frac{\sqrt{S_i^2 + S_j^2}}{|\overline{X}_i - \overline{X}_j|}. \quad (2)$$

Вероятность изменения показателя или, иначе [8], вероятностный критерий надежности выполнения перехода, определяется (3) как интегральная вероятность для наиболее часто рассматриваемых в технологическом проектировании законов распределения случайных величин.

$$\Phi(V) = 2 \cdot \min \left(\begin{array}{l} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\frac{1}{V}} V^{-2} \cdot e^{-0,5 \cdot V^{-2}} dV; \\ 0,5 + \frac{1}{V \cdot \sqrt{6}} + \frac{1}{12 \cdot V^2}; \\ 0,5 + \frac{1}{2 \cdot V \cdot \sqrt{3}} \end{array} \right) - 1. \quad (3)$$

На базе информационных массивов, получаемых в результате обобщения [2] справочных данных, построены вероятностные таблицы точности [3, 6, 7] обработки для различных [9] поверхностей.

Мы считаем, что использование при проектировании планов обработки вероятностных таблиц точности позволяет повысить степень формализации задач маршрутного технологического проектирования за счет возможности применения для проектирования методов и алгоритмов дискретной математики.

При построении матрицы смежности рассматриваются только те технологические переходы, при выполнении которых обеспечивается существенное по величине (более 1) и статистически достоверное (вероятность более 99 %) изменение параметра качества, в

рассматриваемом случае (табл. 2) – параметра шероховатости поверхности Ra.

Таблица 2. Коэффициенты вариации и матрица смежности технологических методов (изменение показателя качества поверхности Ra, крат)

Предыдущий этап обработки		Изменение (отношение)					Матрица смежности				
		Следующий этап обработки									
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	Сверление		1,00	1,15	1,29	2,22		0	0	1	1
2	Зенкерование черновое	0,10		1,15	1,29	2,22			0	1	1
3	Зенкерование получистовое	0,91	0,81		1,12	1,93				0	1
4	Зенкерование чистовое	1,00	1,00	0,68		1,72					1
5	Развертывание получистовое	1,00	1,00	1,00	1,00						

Таким образом, использование вероятностной таблицы точности, построенной в отношении показателя качества обработанной поверхности Ra, позволяет свести задачу генерации плана обработки поверхности к известной в дискретной математике транспортной [5, 8, 9] задаче. Соответственно, для решения технологической задачи, сформулированной подобным образом, применимы алгоритмы дискретной математики и, в частности, алгоритм Дейкстры [1, 3] для нахождения кратчайшего пути в ориентированном графе.

Описанная выше ситуация, при которой рассматривается только один нормируемый показатель качества обработки, является искусственной. На практике, в реальном производстве, нормируется не менее двух групп параметров обработки: показатели точности – чаще всего качество точности или погрешности размеров, – и показатели качества – например, высотные параметры микропрофиля – обработанной поверхности. Включение каждого нового нормируемого параметра в условия рассматриваемой задачи фактически увеличивает размерность условного координатного пространства на единицу.

Так, при двух показателях точности (рис. 4) мы рассматриваем условно плоский граф. Добавив к нормируемым показателям качества изделия, например, параметр опорной длины профиля, мы получим трехмерный граф. В этом случае резко увеличиваются размеры матрицы смежности и количество возможных вариантов перебора для построения кратчайшего пути.

Таким образом, вычислительная сложность алгоритма существенно возрастает, и, соответственно, снижаются его быстродействие и эффективность. Учитывая, что зависимость быстродействия алгоритма Дейкстры от размерности пространства графа является нелинейной – быстродействие уменьшается быстрее, чем растет размерность пространства, – такой подход к решению задачи следует признать не

рациональным. Предлагаемый нами способ рассмотрения многомерных графов заключается в последовательном выполнении следующих шагов.

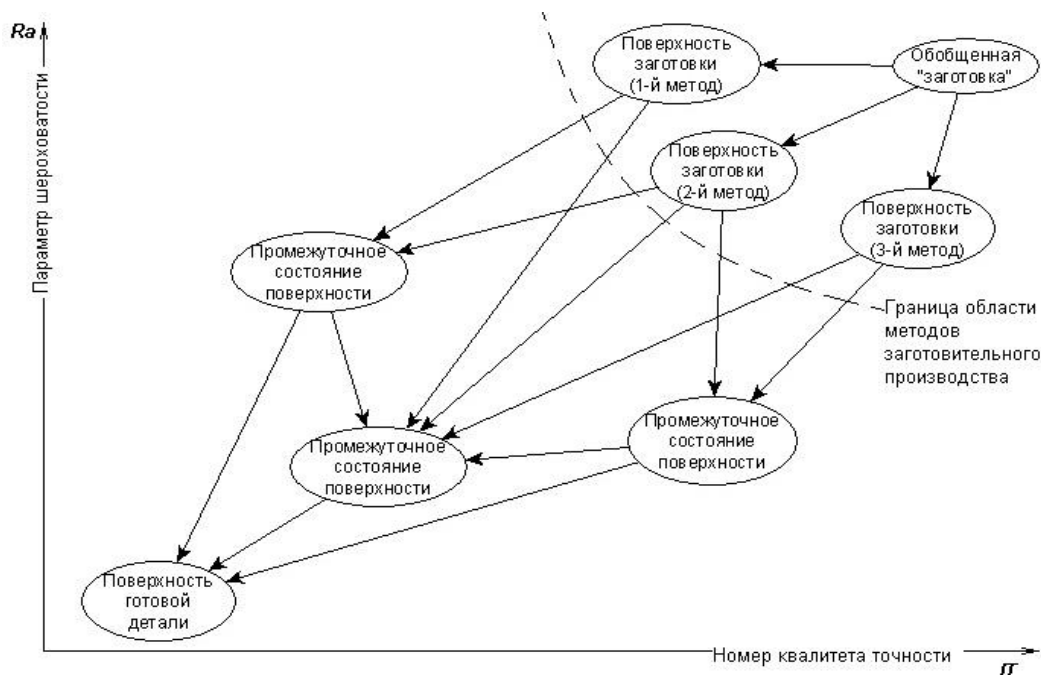


Рис. 4. Условный граф обработки

Рассматриваются вероятностные таблицы точности, построенные для нормируемых параметров и для каждой из них, в соответствии с описанными выше правилами, генерируется собственная (табл. 2, 3) матрица смежности. Нетрудно заметить, что количество смежных вершин для графов, построенных по параметрам Ra и IT , различно, и, следовательно, различным будет и количество возможных маршрутов в графах. Так, например, сочетание переходов «зенкерование полустистовое» – «зенкерование чистовое», гарантирующее повышение точности на 1-2 качества, обеспечивает незначительное (в 1,12 раза) и недостоверное (~68 %) снижение высоты микропрофиля. Следовательно, это сочетание переходов в технологической цепочке не имеет смысла.

Для построения матрицы смежности графа рациональных технологических переходов выполним поэлементное логическое умножение матриц смежности (табл. 2, 3). Результат представлен в табл. 4.

Граф обработки, представленный результирующей (табл. 4) матрицей смежности, описывает возможные сочетания технологических переходов, гарантирующих с достаточной вероятностью последовательное существенное повышение качества обрабатываемой поверхности. Алгоритмы поиска возможных и кратчайшего путей в результирующем графе дадут результаты с такой же эффективностью, как и для задачи, описываемой одним нормируемым показателем качества обработки.

Таблица 3. Изменение показателя точности ИТ и матрица смежности технологических методов

Предыдущий технологический переход		Изменение (разность)					Матрица смежности				
		Следующий технологический переход									
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	Сверление		0,5	1,25	2,75	4		0	1	1	1
2	Зенкерование черновое	0,59		0,75	2,25	3,5			0	1	1
3	Зенкерование получистовое	1,00	0,96		1,5	2,75				1	1
4	Зенкерование чистовое	1,00	1,00	1,00		1,25					1
5	Развертывание получистовое	1,00	1,00	1,00	1,00						

Таблица 4. Результирующая матрица смежности графа обработки

Предыдущий технологический переход		Технологический допуск				Матрица смежности				
		<i>Ra</i> , мкм		<i>IT</i>		Следующий переход				
		<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	1	2	3	4	5
1	Сверление	10	20	12	13		0	0	1	1
2	Зенкерование черновое	10	20	12	13			0	1	1
3	Зенкерование получистовое	4	16	11	12				0	1
4	Зенкерование чистовое	4	10	9	11					1
5	Развертывание получистовое	1,25	6,3	9	10					

Таким образом, логическая модель, представленная вероятностными таблицами точности, позволяет достаточно эффективно применять методы современной математики для формализованного решения технологической задачи построения планов механической обработки, в том числе оптимальных. Следовательно, использование такой модели для построения информационной подсистемы технологического проектирования следует признать рациональным с точки зрения формализации инженерных задач.

Список литературы

1. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013614279 от 26 апреля 2013 г. Проектирование маршрута обработки наружных цилиндрических поверхностей / Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов; ВолгГТУ. – 2013.
2. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012616459 от 18 июля 2012 г. Обобщённые таблицы точности механической обработки / Е.М. Фролов, Ю. Л. Чигиринский; ВолгГТУ. – 2012.
3. Чигиринский Ю. Л. Информационный комплекс проектирования планов механической обработки / Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов, Н. В. Чигиринская // СТИН. – 2013. – № 6. – С. 18-21.
4. Чигиринский Ю. Л. Методика статистического оценивания надежности процесса / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 5 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 8. – С. 53-56.

5. Чигиринский Ю.Л. Методы дискретной математики в технологическом проектировании / Ю. Л. Чигиринский, Н. Д. Гожева, Е. Г. Радченко // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»: межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – Вып. 3. – № 4. – С. 112-114.

6. Чигиринский Ю.Л. Оценка различия достижимых показателей качества поверхности, обработанной различными технологическими методами / Ю. Л. Чигиринский // СТИН. – 2011. – № 5. – С. 32-35.

7. Чигиринский Ю. Л. Подход к формализации индивидуального маршрутного проектирования / Ю. Л. Чигиринский, С. А. Соловьева, Р. Е. Бехтер // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12. – № 1. – С. 581-584.

8. Чигиринский Ю.Л. Структурная оптимизация планов механической обработки по статистическому критерию надежности обеспечения качества / Ю. Л. Чигиринский, А. В. Смутнев, И. В. Фирсов // Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ-2013) : сб. науч. ст. V Междунар. науч.-техн. конф., 22–24 мая 2013 г. / Юго-Западный гос. ун-т [и др.]. – Курск, 2013. – С. 329-333.

9. Чигиринский Ю.Л. Формализация построения последовательности обработки наружных цилиндрических поверхностей / Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов, Ю. Н. Орлова // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 8 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – № 13 (100). – С. 92-97.

Секция 7

**Высокоэнергетические
и комбинированные процессы
формообразования деталей
машино- и приборостроения**

ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ КАК СРЕДСТВО УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

М.В. Грачев

МАТИ имени К.Э. Циолковского, г. Москва, Россия

Тел. (8495) 915-52-93, tpdla@mail.ru

Показана возможность управления формой тонколистового материала из сплава 36НХТЮ методом электроискрового легирования, установлен уровень средних остаточных напряжений, которые возникают в поверхности образца после нанесения покрытия, рассмотрено влияние технологических факторов на эффективность формоизменения. Показана возможность применения локального алмазного выглаживания.

Ключевые слова: формообразование, тонкостенные элементы, остаточные напряжения, электроискровое легирование.

ELECTROSPARK ALLOYING AS THE CONTROL FACILITY THE SHAPE OF THIN-WALLED PARTS

M.V. Grachev

Russian State University of Aviation Technology, Moscow, Russia

Possibility of formation thin-walled sheets from alloy 36NHTU by a method of alloying coatings are shown, the estimation of level middle residual strain, that arising in surface of sample after alloying are established, influence of technological factors on effectivity of formation are considered. Low plastify burnishing are shown.

Keywords: formation, thin-walled sheets, residual strain, electrospark alloying.

На современном этапе развития авиационной и космической техники широко используются тонкостенные детали, которые при малой массе обладают относительно высокой несущей способностью. Одним из таких примеров является лепесток газодинамического подшипника из сплава 36НХТЮ. Применительно к данной детали одна из задач формообразования состоит в необходимости реализации изгиба в одной плоскости. При этом необходимо не только придать форму в виде синусоиды, но и обеспечить требуемое и непостоянное по длине изменение контактных давлений после монтажа детали в узел (рис. 1).

Стандартные методы формоизменения листового материала с учетом его толщины, как правило, мало пригодны, так как необходимо создать изменение контактных давлений по длине контакта с сопрягаемой

деталью. Важно подчеркнуть и то обстоятельство, что при получении тонкого листа прокаткой последний обладает анизотропией механических свойств. В инженерной и научной практике существует ряд технологических методов, которые обеспечивают формирование в поверхностном слое деталей остаточных напряжений и, как следствие, то или иное изменение формы в зависимости от жесткости объекта.



Рис.1. Лепесток газодинамического подшипника

К числу таких методов можно отнести поверхностное пластическое деформирование, нанесение покрытий [1-4].

Целью исследования являлась разработка технологии управления формой детали посредством создания в поверхностном слое детали остаточных напряжений путем нанесения покрытия и его последующей обработки алмазным выглаживанием с применением или без термообработки с обеспечением регламентированного изгиба в нужном направлении, учитывая анизотропию механических

свойств полуфабриката.

Изготовление образцов – прямоугольных пластин размерами 10x30 мм из листа толщиной 0,1 мм – производилось электроэрозионной резкой. Такая технология изготовления образцов по сравнению с механической вырезкой в большей степени исключает влияние силового фактора на механические характеристики образцов. Исходные образцы делились на две группы. В первой группе большая сторона образцов соответствовала направлению проката, во второй – перпендикулярно направлению проката. На этапе изготовления образцов с вышеуказанными размерами было обнаружено, что у образцов, вырезанных вдоль направления проката, наблюдается изгиб порядка 0,2 мм. У пластин, вырезанных поперек проката, измеренная величина изгиба находится в пределах погрешности измерения. В дальнейшем для снижения влияния анизотропии свойств исходного материала проводилась термообработка пластин в вакууме при температуре 800°C в течение 30 мин, которая позволила нивелировать влияние указанного явления.

Для нанесения покрытия использовалось достаточно простое и доступное электроискровое легирование на установке ELFA-731 [5]. Основными варьируемыми параметрами служили величина тока (I) и емкость (C). В качестве электродов использовались минералокерамический

сплав ВК6М, а также проволока из Та и Ag. Покрытие наносилось на разных режимах и на отдельный участок поверхности образца. Траекторией нанесения покрытий являлся зигзаг.

Алмазное выравнивание (далее АВ) осуществлялось на фрезерном станке МАНО МН500W со специально спроектированным приспособлением, которое закрепляется на вертикальной головке фрезерного станка. Причиной выбора данного оборудования послужили его высокая жесткость и точность.

Измерения геометрических параметров образцов проводились на инструментальном микроскопе ММИ-2 с точностью 0,01 мм.

Так как оценка величины остаточных напряжений традиционными способами затруднена (легированный слой неравномерно травится, остаточные напряжения сосредоточены в тонком слое), то использовалось косвенное их определение по величине прогиба обработанных образцов. Расчетная схема образца показана на рис. 2.

Средние значения остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ рассчитывались по формуле:

$$\sigma_{ост} = \frac{8 H E (H - h) f}{3 \pi L^2 h}, \quad (1)$$

где H – толщина пластины; h – толщина легированного слоя; L – длина пластины; E – модуль упругости; f – прогиб пластины в результате действия остаточных напряжений.

Для сравнения в табл. 1 приведен расчет остаточных напряжений по формуле (1) и по формуле, описанной в работе [6]:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2} \left(\frac{1}{R_x} + \frac{\mu}{R_y} \right) z, \quad (2) \quad б)$$

где E – модуль Юнга исследуемого материала; μ – коэффициент Пуассона исследуемого материала; R_x и R_y – радиусы кривизны срединной поверхности; z – расстояние от срединной поверхности.

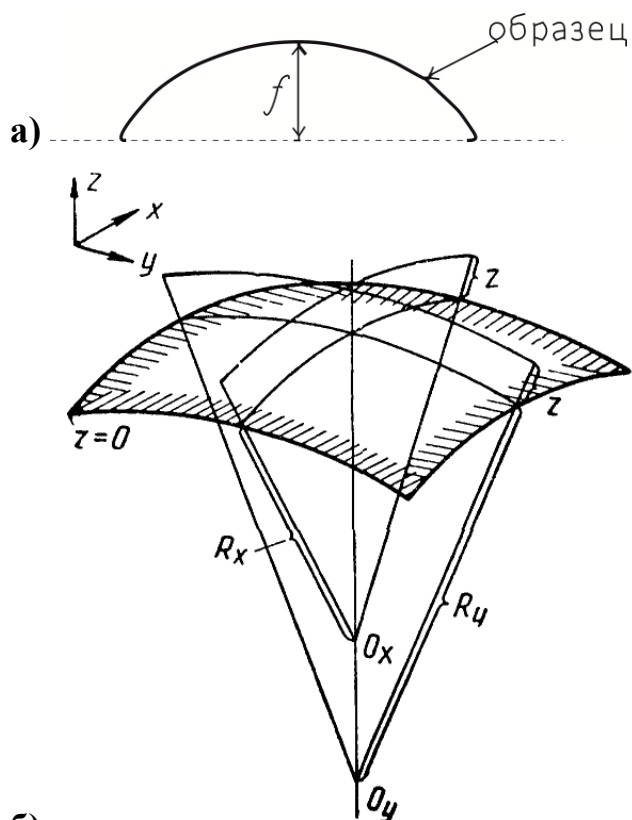


Рис. 2. Геометрия образца: вид сбоку (а), общий вид (б)

Таблица 1. Результаты расчета остаточных напряжений по разным методикам

№	Прогиб f , мм	Остаточные напряжения, МПа		Погрешность, %
		По формуле (1)	По формуле (2)	
1	3,44	656,97	672,94	2,4
2	3,63	693,13	709,98	2,4
3	4,11	785,36	804,45	2,4
4	6,07	1157,70	1185,84	2,4

Напряжения для первого случая рассчитывались исходя из того, что толщина покрытия составляет 9 мкм. Как видно из таблицы, в данном случае погрешность при расчете разными методиками составляет 2,4 %. Для инженерных расчетов такую величину указанной погрешности можно считать вполне приемлемой. Если брать слой толщиной 10 мкм, то погрешность расчета составляет 13 %. Важно подчеркнуть, что в легированном слое формируются растягивающие остаточные напряжения. Оценка технологических факторов процесса электроискрового легирования электродом из ВК6М на величину остаточных напряжений

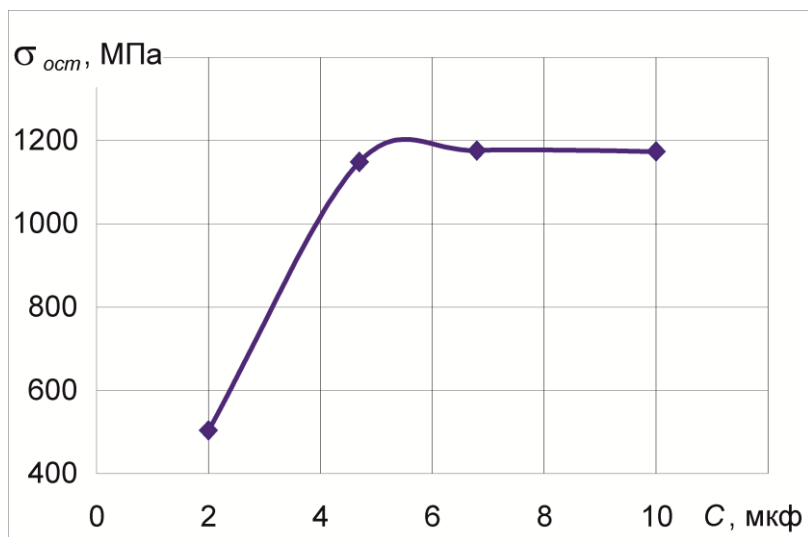


Рис. 3. Влияние емкости конденсаторов (C) при электроискровом легировании электродом из ВК6М на уровень остаточных напряжений $\sigma_{ост}$. Образец в исходном состоянии. Величина тока составляет 2 А

показала (рис. 3), что влияние емкости (C) заметно в интервале от 2 до 5 мкФ.

Интенсивность прироста $\sigma_{ост}$ можно оценить значением на уровне 220 МПа/мкФ. При емкости в интервале от 5 до 10 мкФ практически не наблюдается изменения остаточных напряжений. Дальнейшее увеличение емкости ведет к ухудшению качества поверхностного

слоя и образованию прижогов.

При легировании поверхности электродами из других материалов (серебряная Ag и танталовая Ta проволока) был зафиксирован более высокий уровень остаточных напряжений по сравнению с покрытием из металлокерамики ВК6М (рис. 4). Диапазон эффективного влияния емкости простирается до 10 мкФ.

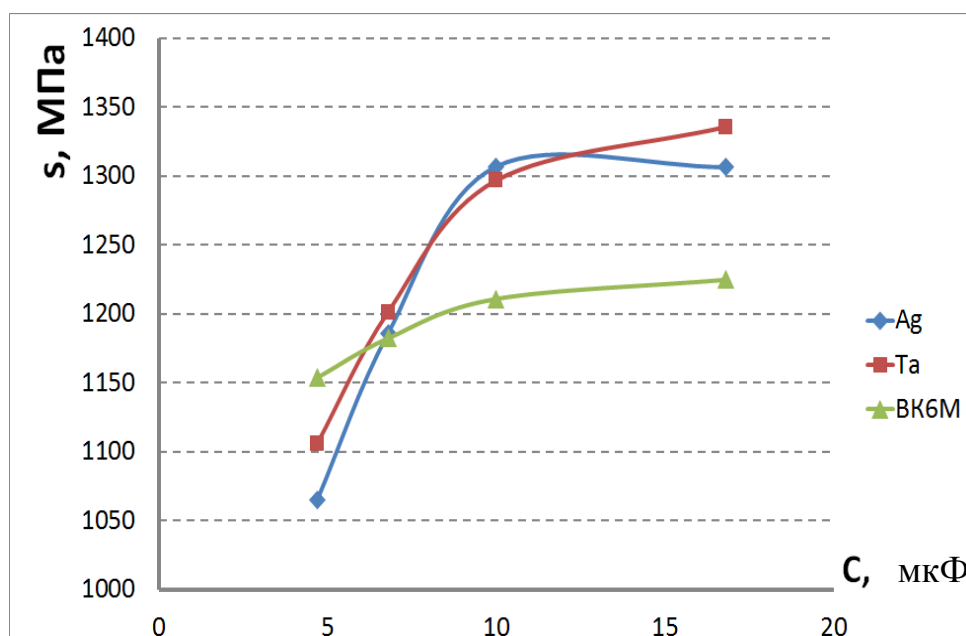


Рис. 4. Изменение остаточных напряжений ($S_{ост}$) в зависимости от емкости конденсаторов (C) для электродов из различных материалов. Образец в исходном состоянии.
Величина тока составляет 2,3 А

Влияние силы тока I на уровень остаточных напряжений представлено на рис. 5 и свидетельствует об их одинаковом росте как вдоль, так и поперек направления проката. Характерным является прогрессирующее изменение величины остаточных напряжений, особенно в интервале от 10 до 15 А. Если сравнивать степень влияния емкости и тока на величину остаточных напряжений, то более эффективным следует считать первый параметр.

Обработка методом электроискрового легирования позволяет придавать различную форму исследуемым образцам. В частности, максимальный прогиб образцов составил 6,15 мм ($I=7$ А, $C=10$ мкФ).

В ходе исследований было также установлено, что у образцов, вырезанных поперек направления проката, кроме изгиба вдоль большей стороны пластины наблюдается кручение, которое возникает в любых случаях, вне зависимости от режима нанесения покрытия. У образцов, вырезанных вдоль направления проката, наблюдается только изгиб.

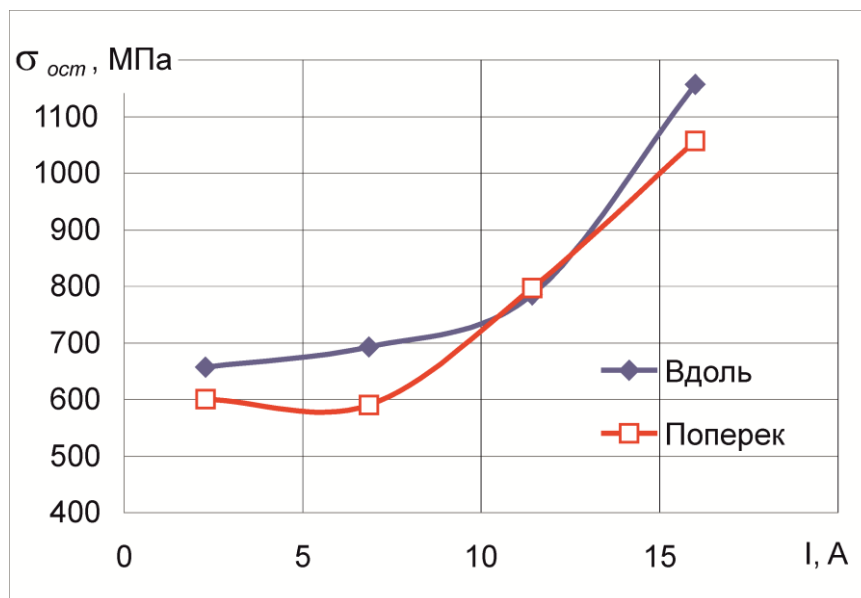


Рис. 5. Влияние силы тока (I) и направления проката на уровень остаточных напряжений. Образец после термообработки в вакууме. Материал электрода ВК6М. Величина емкости 2 мкФ

На рис. 6 представлено фото образца, изогнутого в виде синусоиды при электроискровом легировании. Такая форма детали позволяет обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики изделия.

После электроискрового легирования производилось алмазное



Рис. 6. Образец в виде синусоиды

выглаживание покрытия. Данный вид обработки приводит к тому, что образец начинает изгибаться в сторону, противоположную первоначальному изгибу. Покрытие выглаживалось при нагрузке 5 кг алмазом с радиусом при вершине 2,0 мм. Ширина между строками 0,05 мм.

Традиционным методом испытаний на износ является проведение исследований, в которых парой трения

выступают сам образец и ответное тело из материала, который применяется в механизмах и машинах в реальных условиях обработки. Но у этого метода есть недостатки: высокая трудоемкость; большое время, потребное для проведения испытаний; непригодность для проведения испытаний тонкостенных элементов ввиду применения очень малой нагрузки.

Поэтому для исследования несущей способности поверхностного слоя был выбран метод экспресс-оценки, который обладает рядом преимуществ: малая трудоемкость, высокая достоверность, малое время, потребное для проведения исследований. Для экспресс-оценки износостойкости использовалась малогабаритная установка, осуществляющая изнашивание испытываемой поверхности сферическим индентором при его возвратно-поступательном движении.

Результаты износа образцов представлены на рис. 7. Как видно, наилучшие результаты демонстрирует покрытие из сплава ВК6М после алмазного выглаживания. В то же время покрытия из таких материалов, как Ag, Ta и чистое алмазное выглаживание демонстрируют худшие результаты, чем чистый материал.

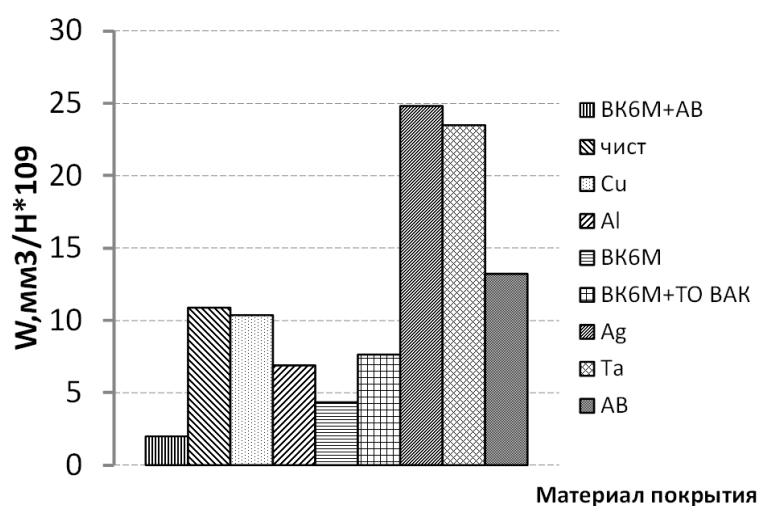


Рис.7. Результаты испытаний образцов на износ

Изнашивание испытываемой поверхности производится алмазным сферическим индентором. Выбор для этих целей алмаза обусловлен его малой изнашиваемостью. Оценку величины износа производят по ширине канавки, образующейся в результате изнашивания. Экспериментально установлено, что за первые 10–50 циклов скольжения индентора происходит пластическое передеформирование с образованием канавки приработки шириной b_n . Последующее увеличение ширины канавки вызвано износом материала. При отсутствии схватывания алмаза с испытываемой поверхностью, которое имеет место только при испытании образцов из титановых сплавов и материалов аналогов титана, изнашивание носит усталостный характер.

В качестве критерия оценки несущей способности поверхностного слоя использовалась удельная характеристика w :

$$w = \frac{V_u}{P_n L}, \quad (3)$$

где P_n - погонная нагрузка; V_u - объем изношенного материала; L - путь трения.

$$P_n = \frac{2 P}{b_k - b_n}, \quad (4)$$

где P - нормальная сила, действующая на индентор; b_n , b_k - ширина канавки после приработки и испытания соответственно.

$$L = 2 l (N_k - N_n), \quad (5)$$

где N_n и N_k - число циклов скольжения алмаза до условной приработки и за время испытания соответственно; l - длина хода алмаза. Учитывая, что:

$$V_u = \frac{(b_k^2 - b_n^2)(b_k + b_n)l}{16 R}, \quad (6)$$

где R - радиус алмазного индентора, получаем выражение для расчета w :

$$w = \frac{(b_k^2 - b_n^2)(b_k + b_n)^2}{64 P (N_k - N_n) R}. \quad (7)$$

Для определения величины w проводятся два последовательных испытания на разных участках поверхности с разным числом циклов скольжения алмазного индентора N_n и N_k . Затем производится измерение величин b_n и b_k . Последние измерялись на инструментальном микроскопе ММИ-2 с точностью до 0,01 мм.

Методика оценки качества рабочих поверхностей ответственных деталей техники по параметрам несущей способности реализована при разработке программно-аппаратного комплекса автоматизированной системы диагностики физико-механических характеристик поверхностного слоя на основе анализа диаграммы вдавливания, в ходе которого учитываются эффекты специальных методов технологического воздействия, таких как поверхностно-пластическое деформирование, нанесение жаростойких и износостойких покрытий, электроискровое легирование, термообработка, а также комбинированных технологий модификации поверхностей [7].

Выводы

Оценка влияния режимов обработки для случая электроискрового легирования поверхностного слоя исследуемых образцов показала, что их жесткость и величина остаточных напряжений зависят от относительной

площади нанесенного покрытия, направления проката, режимов формирования покрытия и термической обработки, материала электрода покрытия, наносимого на деталь, а также исходного состояния материала. В частности, прогиб образцов зависит от шага зигзага, при увеличении шага прогиб уменьшается.

Наряду с формоизменением представляется возможным регулировать эпюру контактных давлений лепестка газодинамического подшипника. Само покрытие может быть использовано как в этом направлении, так и в целях обеспечения износостойкости такого рода деталей.

По результатам проведенных опытов можно констатировать, что метод электроискрового легирования в сочетании с алмазным выглаживанием можно рассматривать как эффективное технологическое средство формоизменения тонкого листового материала за счет формирования остаточных напряжений.

Список литературы

1. Обработка металлопокрытий выглаживанием / Л.А. Хворостухин, В.Н. Машков, В.А. Торпачев, Н.Н. Ильин. – М.: Машиностроение, 1980. – 63 с.
2. Хворостухин Л.А. Управление параметрами качества прецизионных деталей двигателей летательных аппаратов / Л.А. Хворостухин, В.В. Курицына // Полет. – 2007. – № 10. – С. 19-28.
3. Мартынюк А.В. Особенности упрочнения при алмазном выглаживании тонкостенных деталей / А.В. Мартынюк, А.С. Пискарев // Научные труды (Вестник МАТИ). – 2013. – № 20 (92). – С. 169-177.
4. Денисов Л.В. Влияние предварительно-напряженного состояния на особенности формирования остаточных напряжений в поверхностном слое при электроискровом легировании / Л.В. Денисов, А.С. Пискарев, А.Г. Бойцов // Научные труды (Вестник МАТИ). – 2013. – № 21 (93). – С. 188-194.
5. Ковалев А.П. Формирование остаточных напряжений в тонкостенных деталях нанесением электроискровых покрытий / А.П. Ковалев, М.В. Грачев // Авиационная промышленность. – 2012. – № 3. – С. 8.
6. Биргер И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
7. Курицына В.В. Автоматизированная система оценки несущей способности поверхностного слоя деталей авиакосмической техники / В.В. Курицына, М.В. Грачев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2012. – Т. 8. – № 2. – С. 44-49.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ФАРШЕВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

И.В. Злобина, В.А. Коломейцев, Н.В. Бекренев

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Тел. (8452) 998635; E-mail tmm@sstu.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния СВЧ-излучения на структуру и равномерность термической обработки мясных рубленых кулинарных изделий нового состава, включающего муку нута. Показано существенное повышение однородности элементов структуры и равномерности обработки, позволяющее сделать вывод о целесообразности применения данного метода для окончательного приготовления перспективных кулинарных изделий.

Ключевые слова: СВЧ-термия, микроволновое излучение, пористая структура, агломераты, однородность, мука нута, кулинарная готовность

CHANGE OF STRUCTURE OF FARSHEVY COMPOSITE SYSTEMS UNDER THE INFLUENCE OF THE MICROWAVE OVEN OF RADIATION

I.V. Zlobina, V.A. Kolomeytsev, N.V. Bekrenev

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

Results of pilot studies of influence of the microwave oven of radiation on structure and uniformity of heat treatment of meat chopped culinary products of the new structure including a chick-pea's flour are given. Essential increase of uniformity of elements of structure and uniformity of the processing, allowing to draw a conclusion on expediency of application of this method for final preparation of perspective culinary products is shown.

Keywords: microwave thermie, microwave radiation, porous structure, agglomerates, uniformity, flour of chick-pea, culinary readiness

В настоящее время области применения электротехнологических процессов весьма разнообразны: от тонких технологий поверхностного модифицирования с образованием диссипативных наноструктур до объемной закалки, размерной обработки, сварки и наплавки значительных объемов металла. При этом в микроэлектронике, приборостроении и точном машиностроении находят все большее применение технологии СВЧ-электротермии [1]. Успешное развитие СВЧ-технологий в данных областях определило их широкое внедрение в производстве товаров народного потребления и продуктов питания, что диктуется стремлением повысить их конкурентоспособность и улучшить здоровье населения.

Учитывая тенденцию к использованию растительных белков, а также стремление производителей снизить себестоимость продукции, первостепенное значение принимают зернобобовые культуры. Исследования последнего времени показали перспективность введения муки нута в фаршевую структуру мясных изделий, благодаря высокому содержанию белка, пищевых волокон, β -каротина, макроэлементов (калия, магния, кальция, железа) и селена [2,3]. Однако неоднородность структуры таких изделий в сочетании с их многокомпонентным составом создает существенные трудности по равномерному прогреву в процессе термической обработки и может привести к снижению потребительских свойств. В связи с этим приобретает актуальность использование электромагнитного микроволнового излучения сверхвысокой частоты (СВЧ) [1, 4]. Однако, несмотря на активное и широкое использование указанной технологии, существуют недостаточно изученные научно-практические аспекты применения СВЧ-термических процессов при обработке композиционных пищевых продуктов до кулинарной готовности, что не позволяет эффективно применять СВЧ-технологии для термической обработки указанных изделий, перспективных для пищевой отрасли.

Нами проведены сравнительные экспериментальные исследования влияния термической обработки в микроволновой печи и традиционной обжарки на сковороде на структуру изделий с введенной добавкой муки нута. Использовались образцы на основе говяжьего фарша трех категорий: контрольные («классического» элементного состава), с замещением части мяса (5%) мукой нута и с замещением части хлеба (20%) мукой нута размерами 30x20x20 мм. Половину образцов обжаривали на сковороде в течение 20 мин, другую половину подвергали СВЧ-обработке в микроволновой печи марки LG MS-2022G мощностью 700 Вт в течение 4,5 и 5,3 мин соответственно при режиме «выше средней». После обработки образцы разрезали вдоль наибольшей оси и заливали эпоксидной смолой для приготовления шлифов, которые изучали под микроскопом МБС-6 при 12-кратном увеличении. Образцы фотографировали цифровым фотоаппаратом Canon PowerShot A2500. Полученные изображения транслировали в компьютерный анализатор изображений микроструктур АГПИМ-6М, где выполняли их обработку в программе «*Metallograph*». Оценивали внешний вид образцов, распределение пустот (пор) и агломератов в структуре по размерам, включая их дисперсию, и выполняли определение открытой пористости.

Влияние СВЧ-термической обработки на структуру представлено на рис. 1. При СВЧ-обработке контрольных образцов средний размер пор снижается более чем в 2 раза по сравнению с традиционной обжаркой (рис. 1, а, б). При этом поры имеют более правильную округлую форму. При большом увеличении, позволяющем рассмотреть поверхность

единичного агломерата, заметны следующие отличия. После обжарки на сковороде агломерат имеет относительно однородную структуру более светлой окраски, что говорит о меньшей интенсивности нагрева в данной зоне образца. После СВЧ-обработки окраска агломерата более интенсивно темная, в структуре агломерата проявляются микротрещины и микропоры, что может быть связано с высокими градиентами температур в процессе внутреннего трения и поляризации в высокочастотном микроволновом поле.

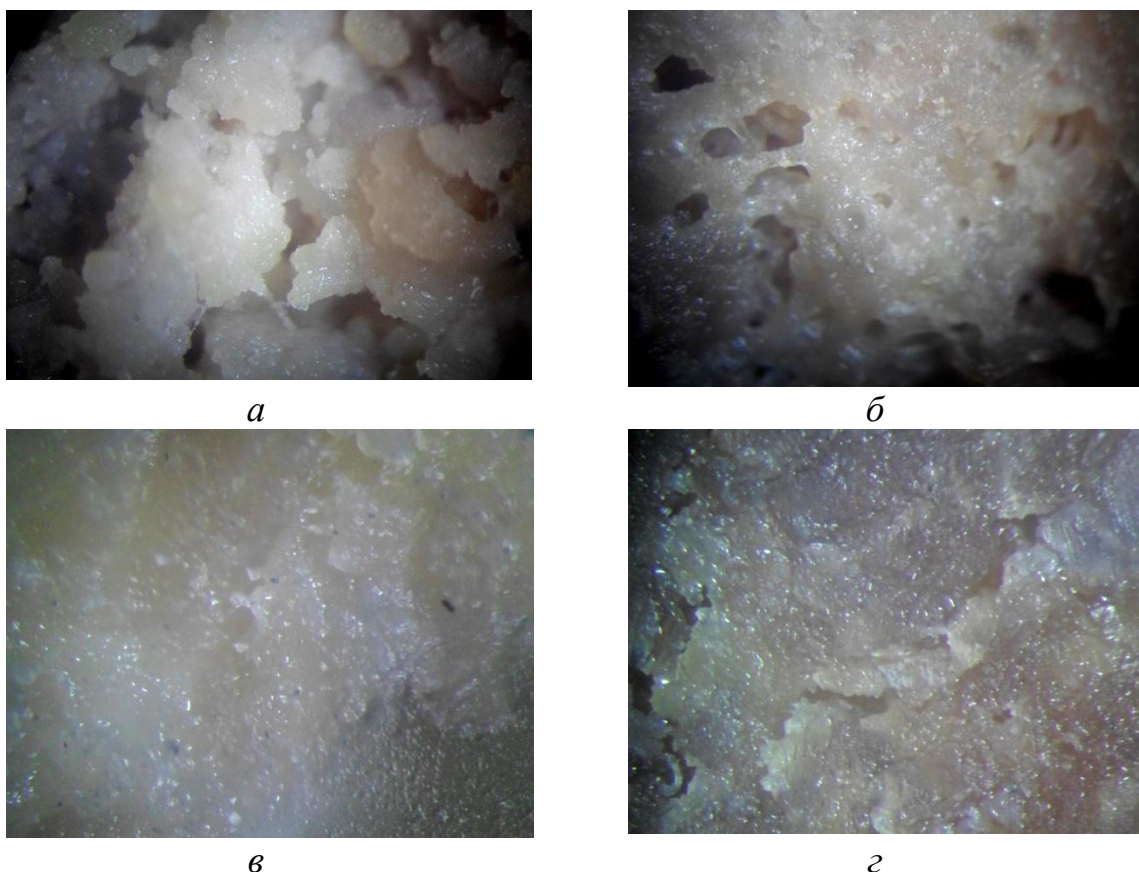


Рис. 1. Структура образцов с заменой 20% хлеба мукой нута при увеличении $\times 100$ (а, б) и $\times 350$ (в, г) после тепловой обработки традиционным способом (а, в) и СВЧ-излучением (б, г)

Добавление муки нута вместо части мяса вызывает при использовании обжарки существенное снижение размеров пор, а при использовании СВЧ-обработки, напротив, приводит к некоторому их увеличению по сравнению с контрольным образцом. При этом ухудшения целостности образца не наблюдается, что объясняется полученными нами данными по оценке когезии образцов. Экспериментальные данные позволяют отметить, что внесение добавки муки нута снижает способность к разрушению в принятых условиях испытаний. Замена части хлеба нутовой мукой приводит во всех случаях к снижению размеров пор. При этом во всех случаях использование СВЧ-обработки способствует

уменьшению разноразмерности пор, что позволяет говорить о равномерном теплопереносе в объеме образца и, как следствие, равномерной его кулинарной обработке, что обеспечит улучшение потребительских свойств.

Влияние СВЧ-излучения на изменение параметров структуры по сравнению с образцом, подвергнутым традиционной обжарке, проявляется по-разному в зависимости от состава образца (рис. 2). В наибольшей степени эффект снижения размеров пор и их дисперсии проявляется у контрольного образца. При замещении части мяса мукой нута отмечается увеличение размеров пор по сравнению с контрольным образцом, а также меньшее снижение дисперсии, при замещении части хлеба мукой нута наблюдается наибольшее снижение как размеров пор, так и их дисперсии. Пористость во всех случаях воздействия СВЧ-излучения возрастает примерно на 10%.

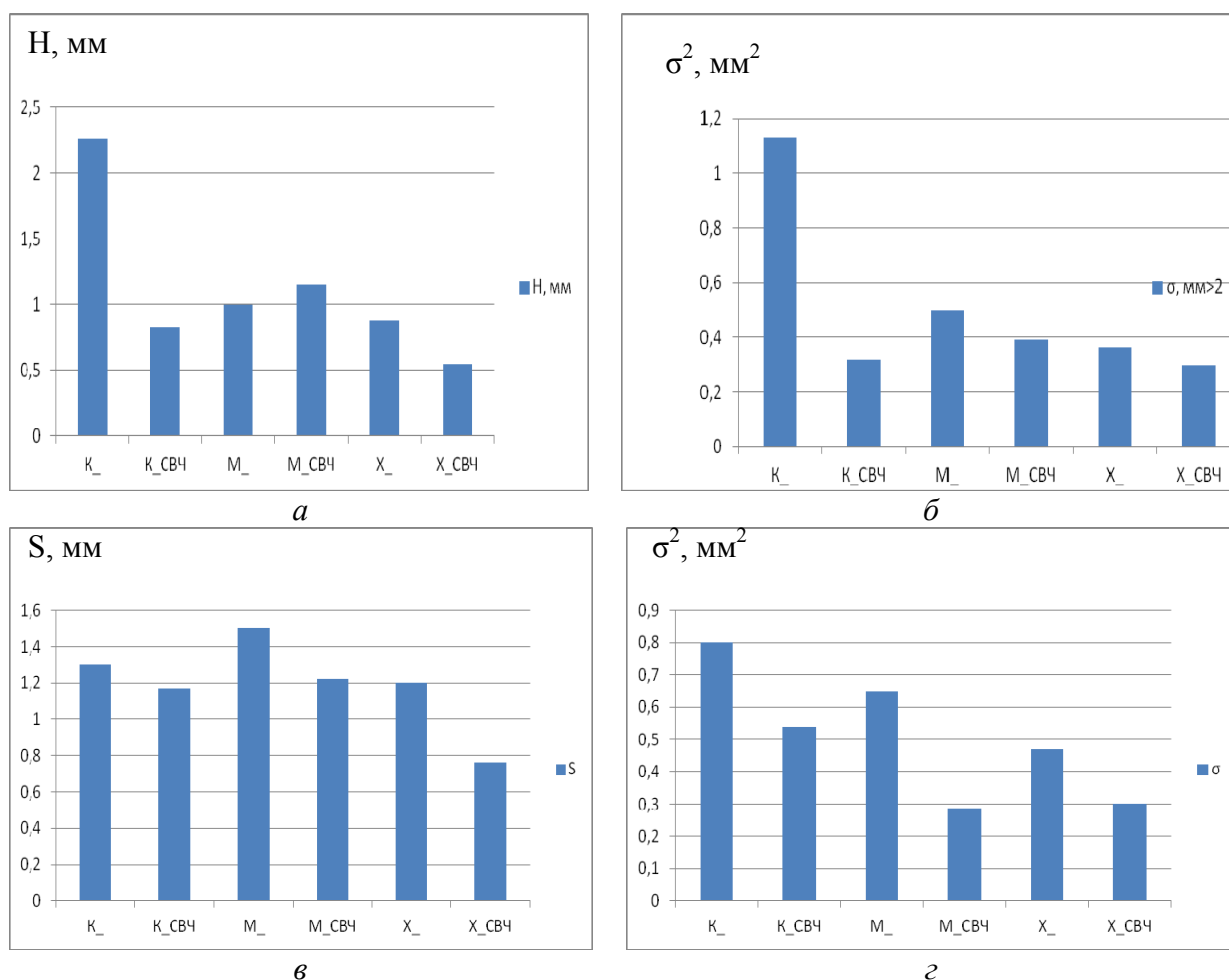


Рис. 2. Влияние метода обработки и состава образцов на размеры пор H (а), агломератов S (в) и их дисперсии σ^2 (б, г): $K_$, $M_$, $X_$ - контрольный образец, образец с замещением части мяса, образец с замещением части хлеба при обжарке на сковороде; $K_CBЧ$, $M_CBЧ$, $X_CBЧ$ - то же при СВЧ-обработке

Изучение размеров агломератов (рис. 2, в, г) позволяет сделать следующие выводы. В исходном фаршевом материале наиболее распространенный размер гранул (84%) составляет 0,5-4,5 мм или в среднем – 2,26 мм. После обжарки на сковороде и СВЧ-термической обработки размеры агломератов снижаются соответственно на 74 и 93%. Большее снижение размеров после СВЧ-воздействия, очевидно, связано с равномерным проникновением энергии в объем образца и более интенсивным выпариванием жидкости, что приводит к большей сублимации агломератов. При замене 5% мяса мукой нута тенденция снижения размеров агломератов проявляется в меньшей степени и составляет соответственно 47 и 88%. По-видимому, это связано с меньшей теплопроводностью нута, что способствует сохранению его исходной влажности и по окончании обработки обеспечивает наполнение агломератов влагой и некоторую релаксацию их размеров.

При замене 20% хлеба мукой нута и СВЧ-термической обработке наблюдается существенное снижение размеров агломератов (почти в 3 раза).

Последний факт может быть связан с иными электрофизическими характеристиками хлеба по сравнению с мясом и нутом и большей долей его замены последним, что способствует при СВЧ-воздействии интенсификации процессов сублимации агломератов, представляющих собой композицию мясного фарша и муки нута.

Дисперсия размеров агломератов при любом составе образцов меньше, чем в образцах, подвергнутых традиционной обработке, от 1,5 до 2,5 раз.

В целом следует отметить меньшее влияние как вносимой добавки, так и метода обработки на размеры агломератов по сравнению с размерами пор (пустот) в структуре (рис. 2).

Таким образом, выполненные нами исследования показали, что неоднородность теплофизических свойств исходных полуфабрикатов, повышенная у опытных образцов по сравнению с контрольным вследствие введения растительной добавки в виде муки нута, не оказывает существенного влияния на равномерность СВЧ-термической обработки изделий и структурные параметры, напротив, применение СВЧ-излучения способствует снижению как размеров пор, так и агломератов, и разбросу их размеров при одновременном увеличении пористости. Указанная особенность имеет положительное влияние на повышение равномерности нагрева изделия при его повторной термической обработке, необходимой после размораживания, а также способствует сохранению целостности изделий при хранении и транспортировке. Приведенные результаты свидетельствуют о целесообразности применения СВЧ-излучения для окончательной термической обработки до кулинарной готовности мясных

рубленых кулинарных изделий с добавлением муки нута или аналогичных добавок. В дальнейшем необходимо проведение исследований по определению оптимальных режимов СВЧ-обработки (удельной мощности и времени) с целью улучшения выявленных нами результатов.

Список литературы

1. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник / Ю.С. Архангельский.– Саратов: Научная книга, 2011. – 560 с.
2. Злобина И.В. Исследование мясных кулинарных изделий с добавлением муки нута / И.В. Злобина, Н.М. Птичкина // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2012. – № 3(14).– С. 30-36.
3. Злобина И.В. Обогащение мясных кулинарных изделий растительным белком / И.В. Злобина, Н.М. Птичкина // Научный электронный архив. URL: <http://forum2009.rae.ru/26/337> (дата обращения: 30.04.2013).
4. Рогов И.А. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. – М.: Агропромиздат, 1986. –361 с.

УДК 621.365.5.029.5, 664.046.1

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВЧ-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЯСНЫХ РУБЛЕННЫХ КУЛИНАРНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ МУКИ НУТА

И.В. Злобина, В.А. Коломейцев, Н.В. Бекренев

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Тел. (8452) 998635; E-mail tmm@sstu.ru, irinka_7_@mail.ru

На основе критериального уравнения, описывающего взаимосвязь времени кулинарной готовности мясных кулинарных изделий с добавлением муки нута, их плотности и теплофизических свойств с удельными затратами энергии, получены зависимости, позволяющие определить рациональные значения удельной мощности и напряженности поля при СВЧ-термической обработке и установить оптимальное время СВЧ-воздействия. Даны рекомендации по выбору типа магнетрона для промышленной СВЧ-установки.

Ключевые слова: СВЧ-термическая обработка, удельная мощность, напряженность поля, плотность, теплоемкость, теплопроводность, температура обработки, энергетические затраты, мясные рубленые кулинарные изделия, мука нута.

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE MICROWAVE OVEN TECHNOLOGY – HEAT TREATMENT OF MEAT CHOPPED CULINARY PRODUCTS WITH ADDITION OF THE FLOUR OF CHICK-PEA

I.V. Zlobina, V.A.Kolomeytsev, N.V.Bekrenev
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

On the basis of the criteria equation describing interrelation of time of culinary readiness of meat culinary products with addition tortments chick-pea, their density and heatphysical properties with specific expenses of energy, the dependences, allowing to define rational values of specific power and intensity of a field at the microwave oven – heat treatment are received and to determine optimum time of the microwave oven of influence. Recommendations about a choice like the magnetron for industrial are made by the microwave oven of installation.

Keywords: the microwave oven – heat treatment, specific power, intensity of a field, density, a thermal capacity, heat conductivity, processing temperature, power expenses, meat chopped culinary products, a flour of chick-pea.

В настоящее время СВЧ-технологии широко применяются в различных областях техники. Большая роль принадлежит им и в пищевой промышленности. В основном эти процессы используются для пастеризации продуктов, сушки и сублимации, а в бытовых условиях – для размораживания и подогрева. Известны работы по применению СВЧ-излучения для окончательной термической обработки продуктов [1,2]. Однако, технологические возможности СВЧ-термической обработки для окончательной обработки неоднородных по составу и структуре изделий типа фаршевых систем с растительными добавками на основе бобовых культур, в частности нута, еще мало изучены. Применение последних является весьма перспективным вследствие высокого содержания белка, пищевых волокон, β -каротина, макроэлементов (калия, магния, кальция, железа) и селена [3,4].

На основе комплексных теоретико-экспериментальных исследований и моделирования нами составлено критериальное уравнение процесса жарки мясных рубленых кулинарных изделий:

$$\mathcal{E}\tau^{0,8}\left(\frac{\rho}{N}\right)^{0,4} = A\left[ct\left(\frac{\rho}{N}\right)^{0,4}\tau^{0,8}\right]^{\alpha}\left[\frac{\lambda t}{\rho^{0,2}N}\tau^{0,6}\right]^{\beta}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}$ - удельные затраты энергии на процесс приготовления исследуемого объекта; c – теплоемкость; λ – теплопроводность; ρ – плотность; N – подводимая мощность; t – температура кулинарной готовности

объекта; τ – время кулинарной готовности объекта; A – коэффициент скорости процесса; α и β – характеристические коэффициенты процесса.

В дальнейшем данное уравнение было преобразовано с учетом того, что в СВЧ-электротермии основным режимным параметром является удельная мощность тепловых потерь, связанная с подводимой мощностью соотношением:

$$N = P_{y\partial} \nu, \quad (2)$$

где $P_{y\partial}$ – удельная мощность; ν – объем обрабатываемого объекта.

В свою очередь, объем связан с массой и плотностью изделия как:

$$\nu = \frac{m}{\rho}. \quad (3)$$

Экспериментально были установлены для процесса СВЧ-термической обработки изделий следующие диапазоны указанных коэффициентов $A = 0,22-0,63$; $\alpha = 0,64-0,67$; $\beta = 0,23-0,36$. Приняв минимальные значения коэффициентов, и с учетом (2) и (3) критериальное уравнение можно привести к виду:

$$\mathcal{E} \tau^{0,8} \left(\frac{\rho^2}{P_{y\partial} m} \right)^{0,4} = 0,22 \left[ct \left(\frac{\rho^2}{P_{y\partial} m} \right)^{0,4} \tau^{0,8} \right]^{0,64} \left[\frac{\lambda t \rho^{0,8}}{P_{y\partial} m} \tau^{0,6} \right]^{0,23}. \quad (4)$$

Раскрывая скобки и решая относительно удельной мощности тепловых потерь, получим:

$$P_{y\partial} = \frac{0,22 \cdot 10^{-7} t^{10,1} c^{7,44} \lambda^{2,67}}{\mathcal{E}^{11,63} \tau^{1,21} \rho^{1,21} m}. \quad (5)$$

Известно, что плотность рубленых мясных изделий составляет 1020 кг/м^3 [1,2]. Ранее нами были определены оптимальные рецептуры фаршевых систем с добавлением муки нута следующих составов: I – замена 5% мяса мукой нута, II – замена 20% хлеба мукой нута. Экспериментально при помощи компьютерного анализатора изображений микроструктур АГПМ-6М (рис. 1) нами установлено, что после СВЧ-термической обработки пористость изделий составляет в среднем 40% и 33,3% соответственно. Это позволяет принять среднюю за период обработки плотность изделий равной в первом случае 816 кг/м^3 , во втором случае – $850,2 \text{ кг/м}^3$. Также теплоемкость и теплопроводность изделий определены нами в зависимости от температуры термической обработки на уровне значений, представленных в табл. 1. С учетом этого расчетом по (5) нами определена удельная мощность СВЧ-термической обработки в зависимости от температуры и времени кулинарной готовности изделий при обеспечении минимальных энергетических затрат, которые предварительно были определены для исследуемых изделий на уровне $3150 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$. Указанные зависимости представлены на рис. 2 и 3.

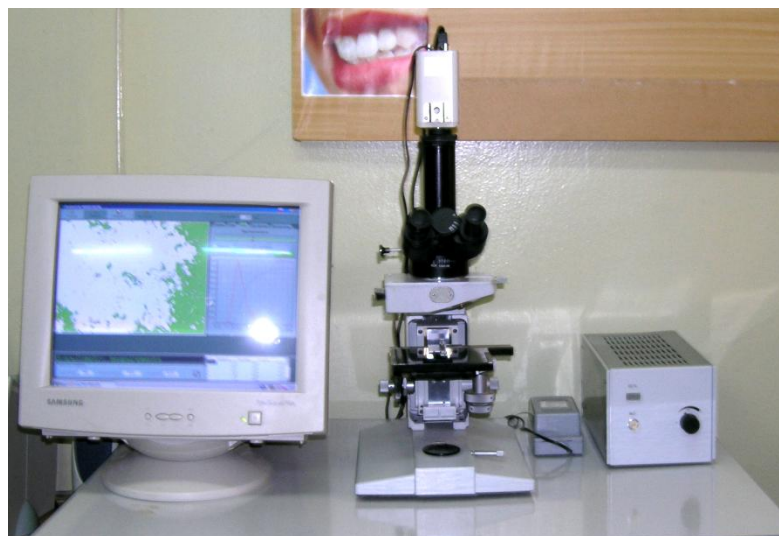


Рис.1. Компьютерный анализатор изображений микроструктур АГПМ-6М

Таблица 1. Зависимость теплофизических характеристик фаршевых систем от состава и температуры термической обработки

Состав	Замена 5% мяса мукой нута			Замена 20% хлеба мукой нута		
t, K	343	353	363	343	353	363
$c, Дж/кг \cdot K$	2650	2600	2600	2650	2590	2530
$\lambda, Вт/м \cdot K$	0,39	0,426	0,44	0,392	0,427	0,465

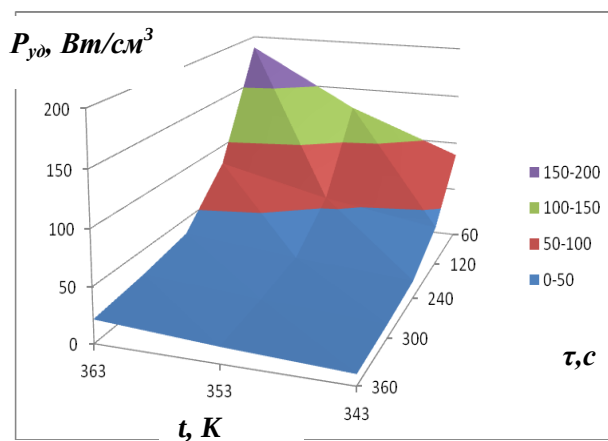


Рис. 2. Зависимость удельной мощности от температуры и времени кулинарной готовности при замене 5% мяса мукой нута

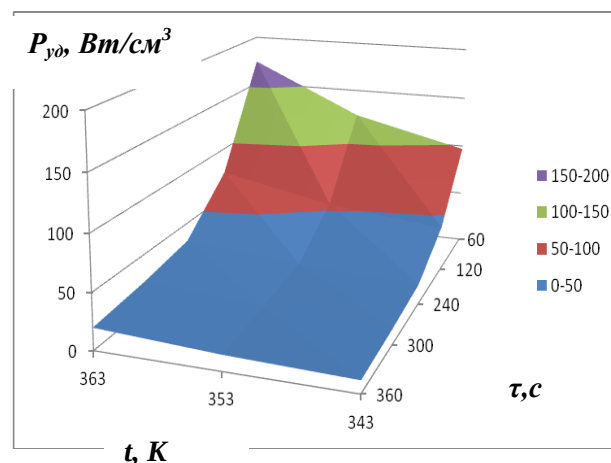


Рис. 3. Зависимость удельной мощности от температуры и времени кулинарной готовности при замене 20% хлеба мукой нута

Из графиков следует, что в наибольшей степени удельная мощность зависит от температуры при минимальном времени готовности, а зависимость от времени более выражена при максимальной температуре

готовности. Минимальная удельная мощность обеспечивается при меньших температурах обработки и большем времени готовности.

Ниже представлены зависимости удельной мощности от температуры обработки и состава изделий при максимальном и минимальном времени обработки из исследованного диапазона (рис. 4 и 5).

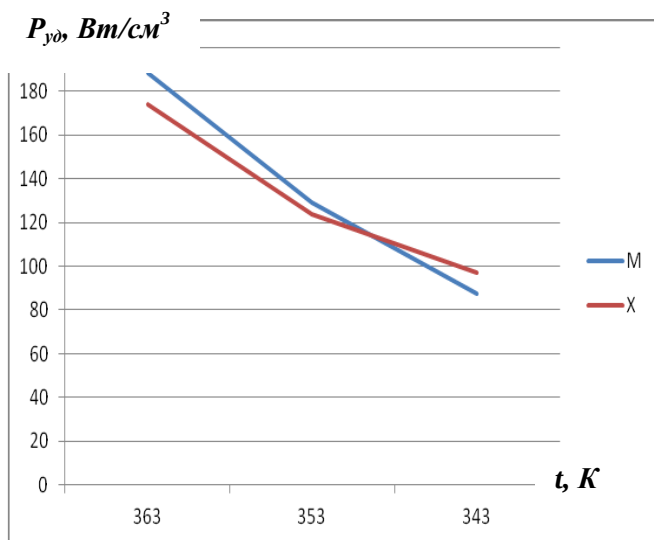


Рис. 4. Зависимость удельной мощности от температуры при времени обработки 1 мин

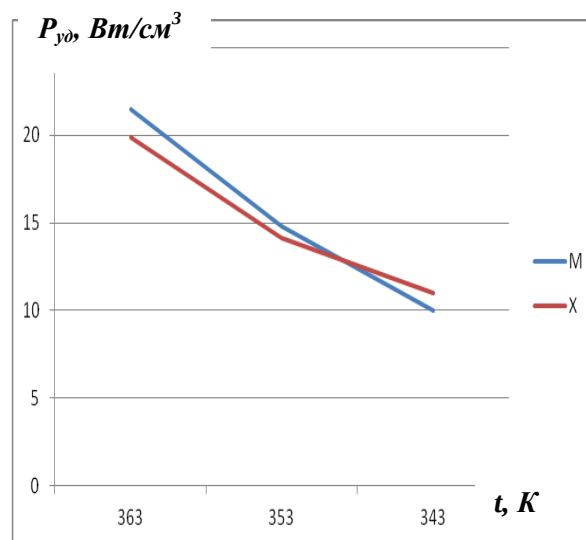


Рис. 5. Зависимость удельной мощности от температуры при времени обработки 6 мин

Из графиков видно, что как при малом, так и при большом времени обработки изделий удельные мощности их приготовления с заменой части мяса и части хлеба мукой нута практически одинаковы при температуре, близкой 353К. Этот факт позволяет рекомендовать данную температуру СВЧ-термической обработки композиционных фаршевых систем.

Для качественного приготовления изделий необходим их равномерный прогрев, который для случая СВЧ-термической обработки будет определяться глубиной проникновения излучения, под которой в СВЧ-термии понимают расстояние, на котором поглощенная мощность снижается в e раз [1]:

$$\Delta = \frac{\lambda}{f \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}} \text{ или для рассматриваемого случая } \Delta = \frac{9,55 \cdot 10^7}{f \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}}, \quad (6)$$

где f – частота СВЧ-излучения; ε' – диэлектрическая проницаемость изделия; δ – угол диэлектрических потерь.

На основе приведенных в [1] табличных зависимостей ε' и δ от плотности материала получены аппроксимирующие эмпирические формулы:

$$\varepsilon' = 0,025 \rho^{1,1}, \quad \varepsilon'' = 4,754 \rho^{0,247}, \quad \operatorname{tg} \delta = 190,16 \rho^{-0,853}. \quad (7)$$

С учетом (7) выражение (6) преобразуется к виду:

$$\Delta = 0,318 \cdot 10^7 \frac{\rho^{0,3}}{f} . \quad (8)$$

Расчеты по (8) позволили получить зависимость глубины проникновения излучения в фаршевую систему от частоты и плотности объекта (рис. 6), из которой следует, что в разрешенном диапазоне частот (915 и 2450 МГц) приемлемая глубина проникновения, обеспечивающая равномерный прогрев при стандартной толщине изделия в 20 мм, равная 17-27 мм, обеспечивается на частоте 900 ± 15 МГц в рассматриваемом диапазоне плотностей системы.

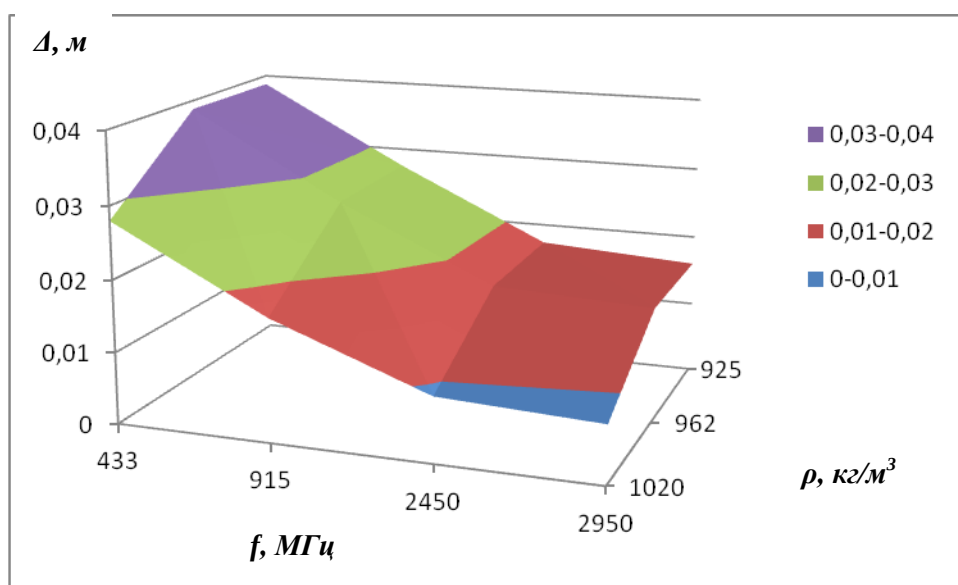


Рис. 6. Влияние частоты излучения и плотности изделия на глубину проникновения

С целью выявления режимов СВЧ-обработки, обеспечивающих качественное и эффективное приготовление стандартной в пищевой промышленности партии изделий в 100 штук, была проведена расчетная оценка суммарного объема изделий в зависимости от времени их кулинарной готовности для двух видов фаршевых систем, указанных выше. При этом использовали очевидное выражение:

$$V = \frac{N_{\text{вых}}^n}{P_{\text{уд}}} , \quad (9)$$

где $N_{\text{вых}}^n$ - выходная полезная мощность магнетрона СВЧ-установки, определяемая с учетом его КПД.

Из справочника [1] были взяты три типа магнетронов: М93, М116, М116-100 с мощностями соответственно 25, 50 и 100 кВт. Коэффициент полезного действия первых двух моделей составляет 75%, третьей – 85%. С учетом этого в расчетах учитывалась полезная мощность, составляющая для М93 – 18750 Вт, для М116 – 37500 Вт, для М116-100 – 85000 Вт.

При определении количества изготавливаемых за одну загрузку изделий модель единичного объекта была принята в виде цилиндра с высотой $h=2$ см и диаметром $D=6$ см (принято среднее значение, т.к. стандартный размер изделий составляет 5-7 см). Количество изделий определяли по выражению:

$$n = \frac{V}{V_i},$$

где $V_i = \frac{\pi D^2}{4} h$ - объем единичного изделия.

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Из данных табл. 2 следует, что применение режимов обработки со временем кулинарной готовности в 1-5 минут нерационально, поскольку при установлении времени 4 и 5 минут количество изделий существенно меньше, чем при времени 6 минут. Использование 6 загрузок по 1 минуте или 3 по 2 минуты (суммарное время – 6 минут) также не обеспечивает требуемого количества приготовления изделий. Увеличение времени более 6 минут нецелесообразно по экономическим соображениям. Применение магнетронов мощностью 25 и 50 кВт не обеспечивает требуемой стандартной загрузки во всем диапазоне времен кулинарной готовности.

Таблица 2. Количество изделий, которое возможно приготовить в СВЧ-термической установке различной полезной мощности в зависимости от времени (результаты округлены до целого в меньшую сторону)

Время приготовления, мин		1		2		4		5		6	
Состав		5% мяса	20% хлеба	5% мяса	20% хлеба	5% мяса	20% хлеба	5% мяса	20% хлеба	5% мяса	20% хлеба
Мощность, кВт	25	2	2	6	6	13	14	17	18	22	23
	50	5	5	11	12	27	28	35	37	44	46
	100	11	12	26	28	61	64	81	85	101	106

Таким образом, на основе анализа полученного критериального уравнения термической обработки мясных рубленых изделий с добавлением муки нута и его преобразования с учетом процесса СВЧ-воздействия на объект с неоднородными структурой и составом определены целесообразные технологические режимы, обеспечивающие изготовление в производственных условиях за одну загрузку от 101 до 106 изделий: частота излучения 900 ± 15 МГц, удельная мощность 14,1-14,8 Вт/см³, температура нагрева 353 К (80° С), время кулинарной готовности 6 минут. В установке должен быть использован магнетрон с выходной мощностью 100 кВт и КПД не ниже 85%.

Список литературы

1. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Научная книга, 2011. – 560 с.
2. Рогов И.А. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. – М.: Агропромиздат, 1986. – 361 с.
3. Злобина И.В. Исследование мясных кулинарных изделий с добавлением муки нута / И.В. Злобина, Н.М. Птичкина // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2012. – № 3(14). – С. 30-36.
4. Злобина И.В. Обогащение мясных кулинарных изделий растительным белком / И.В. Злобина, Н.М. Птичкина // Научный электронный архив. URL: <http://forum2009.rae.ru/26/337> (дата обращения: 30.04.2013).

УДК 621.9.048.6

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОТВЕРСТИЙ, ОБРАБОТАННЫХ ИНСТРУМЕНТОМ, ЗАТОЧЕННЫМ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

О.Ф. Корпелянский

*Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград, Россия; E-mail: stanki@vstu.ru*

Описывается влияние специального способа заточки осевого металлорежущего инструмента с введением ультразвуковых волн в зону переточки на точность обрабатываемых отверстий. Приведены экспериментальные данные, позволяющие оценить преимущества данного способа заточки.

Ключевые слова: осевой инструмент, заточка, диаметр отверстия, точность отверстия.

IMPROVING THE ACCURACY OF HOLES PRODUCED BY THE TOOL, SHARPENED WITH ULTRASONIC VIBRATIONS

O.F. Korpelyansky

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

The article describes a special way to sharpen the axial cutting tools with the introduction of ultrasonic waves in the area resharpening to accuracy of processed holes. And also gives the experimental data to allow assessment the advantages of this method of sharpening.

Key words: axial tool, the sharpening, hole size, accuracy of hole.

В условиях современного машиностроения и металлообработки одной из важнейших задач является повышение технического уровня и качества выпускаемой продукции. При этом более половины технологических процессов содержат операции по точной обработке отверстий, к которым также предъявляются все более жесткие требования. В производственных условиях отверстия с точностью H6-H7 получают шлифованием, растачиванием, протягиванием и развертыванием. Развертывание, по сравнению с другими финишными операциями, является более высокопроизводительным процессом, так как не требует настройки инструмента на размер обрабатываемых отверстий [1].

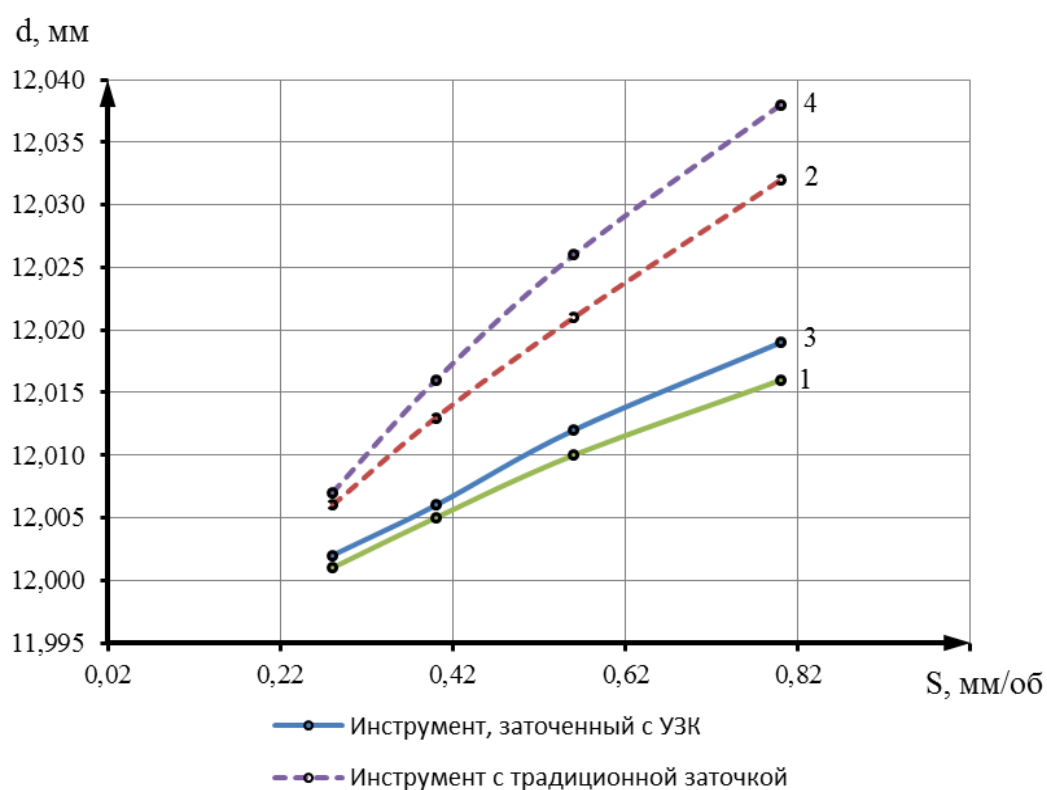
Однако, несмотря на то, что после операции развертывания получаются качественные отверстия, зачастую требования к их точности более жесткие, нежели реально получаемые параметры отверстий. Ввиду этого весьма актуальным становится вопрос о возможных способах повышения точностных характеристик отверстий при финишных операциях, в частности при развертывании.

Одним из таких способов является повышение точности отверстий, обработанных инструментом, заточенным специальным способом. Данный способ заключается в том, что в момент переточки металлорежущего инструмента, в зону перешлифовки вводятся механические колебания ультразвуковой частоты. Этот способ был описан автором ранее [2,3]. Для реализации данного способа заточки инструмента было сконструировано и изготовлено специальное приспособление, предназначенное для введения ультразвуковых колебаний в зону переточки, также описанное ранее [4]. Введение механических ультразвуковых колебаний в зону переточки позволяет изменить некоторые характеристики данного процесса, а именно:

- периодически изменяются величина и направления вектора действительной скорости резания;
- периодически изменяется толщина срезаемого слоя;
- изменяется характер приложения нагрузки: статическая переходит в знакопеременную динамическую нагрузку;
- изменяется формирование поверхностного слоя детали в процессе обработки заготовки;
- улучшаются условия проникновения СОТС в зону резания;
- изменяются контактные взаимодействия на рабочих поверхностях режущих инструментов, приводящих к уменьшению деформаций в зоне стружкообразования и сил резания [5].

Все вышеописанные изменения процесса заточки инструмента приводят к изменению качественных характеристик заточенного инструмента. В частности, снижается величина шероховатости

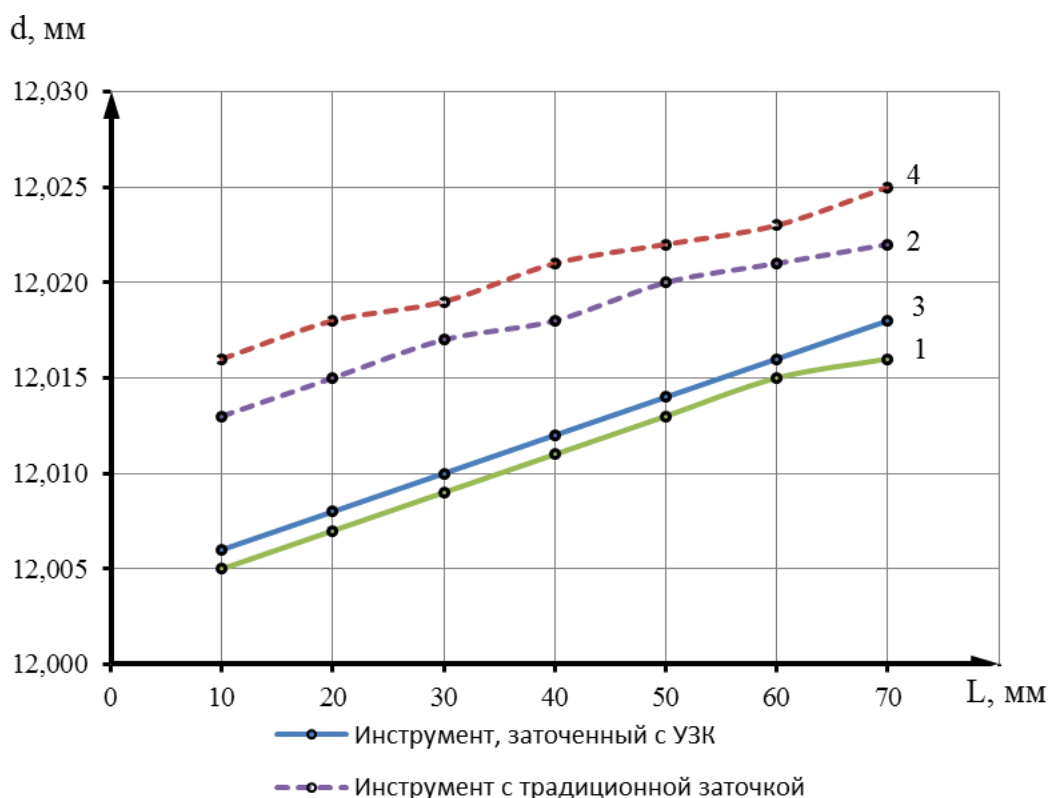
поверхности режущих кромок, режущий клин становится более острым, по отношению к инструменту с традиционной заточкой (снижается радиус закругления режущей кромки). Использование в процессе развертывания инструмента с предлагаемым способом заточки позволяет существенно улучшить точностные характеристики обработанных им отверстий. На рис.1 представлены результаты экспериментов по выявлению разбивки обработанных отверстий, полученных развертыванием инструментом с разными типами заточек. Эксперименты проводились на двух видах сталей – ОХМ и сталь 40 при различных осевых подачах инструмента. Как видно из графика, отверстия, обработанные инструментом, заточенным с введением ультразвуковых колебаний в зону переточки, имеют более низкие и плотно распределенные показатели по разбивке.



материал - сталь ОХМ (3, 4), сталь 40 (1, 2), инструмент - развертка
 $\varnothing 12\text{мм}$, Р6М5, $V=0,078\text{ м/с}$

Рис.1. Зависимость разбивки отверстий от величины осевой подачи обрабатывающего инструмента

На рис. 2 представлены результаты измерений изменения диаметра обработанных отверстий в зависимости от глубины обработки. Как видно из графиков, по всей глубине отверстий инструмент, заточенный предложенным способом, дает более качественные точностные характеристики при обработки обоих видов стали.



материал - сталь ОХМ (3, 4), сталь 40 (1, 2), инструмент - развертка
 $\varnothing 12\text{мм}$, Р6М5, S=0,28 мм/об

Рис. 2. Зависимость разбивки отверстий в зависимости от глубины обработки

Ввиду полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что введение ультразвуковых колебаний в зону резания при заточке инструмента позволяет повысить точность обработанных им отверстий, а также положительно влияет на другие качественные характеристики обработанных деталей.

Список литературы

1. Агапов С.И. Интенсификация процесса обработки труднообрабатываемых материалов при введении ультразвуковых колебаний в зону резания: монография / С.И. Агапов; ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – 78 с.
2. Корпелянский О.Ф. Способ заточки осевого инструмента с введением ультразвуковых колебаний в зону перешлифовки / О.Ф. Корпелянский // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 7 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»).
3. Корпелянский О.Ф. Влияние введения ультразвуковых колебаний в зону переточки осевого режущего инструмента на радиус закругления режущей кромки/ О.Ф. Корпелянский, С.И. Агапов, А.Б. Травов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 20 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»).

4. Корпелянский О.Ф. Ультразвуковое приспособление для заточки осевого инструмента / О.Ф. Корпелянский//Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 7 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»).

5. Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1968. - 367 с.

УДК 621.791.14

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

А.Г. Бойцов, Д.Н. Курицын, Л.В. Денисов

МАТИ имени К.Э. Циолковского, г. Москва, Россия

Тел. (8495) 915-52-93, tpdla@mail.ru

Представлены результаты исследований по экспериментальной отработке применения высокотвердого инструмента различной конструкции для сварки трением с перемешиванием авиационных материалов. По результатам моделирования вязкого течения материала в зоне обработки и экспериментальной отработки процесса определены оптимальные конфигурации рабочей части инструмента. Предложены технологические схемы изготовления специального инструмента методом электроэрозионного фрезерования.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, инструмент, электроэрозионное фрезерование, аэрокосмическая техника, качество сварного соединения.

SHAPE OPTIMIZATION AND MANUFACTURING TECHNOLOGY OF SHAPED PROFILE TOOL FOR FRICTION STIR WELDING

A.G. Boytsov, D.N. Kuritsyn, L.V. Denisov

Russian State University of Aviation Technology, Moscow, Russia

The work presents the results of research on the development, application of highly rigid tool various designs for Friction Stir Welding of aviation materials. On the results of simulation of viscous flow of material in the area of treatment and experimental development of the process the optimal configuration of a working part of the tool were defined. Proposed technological schemes of the manufacture of the special tool by EDM milling.

Keywords: friction stir welding, the tool, EDM milling, the space technics, quality of welded connection.

Расширяющееся применение сварки трением обусловлено высоким качеством получаемых сварных соединений. Выполненные в последние годы исследования показали, что сварка трением с перемешиванием (СТП) является эффективным способом получения высококачественных соединений конструкций различной геометрии, включая листовые материалы, пространственные профильные конструкции, трубы, а также восстановления изношенных деталей, модифицирования поверхностей и залечивания трещин и литейных дефектов [1]. Деформация и перемешивание металла в твердой фазе в условиях «теплой» деформации создают микроструктуры, более прочные, чем основной материал.

Сварка трением с перемешиванием является процессом соединения материалов в твердом состоянии, при котором специальный вращающийся инструмент, конструктивно состоящий из плоского или профилированного основания (бурта) и расположенного на нем наконечника с различным профилем (пина), перемещается вдоль поверхностей стыка свариваемых деталей (рис. 1) [2]. Трение бурта и пина в контакте со свариваемым материалом вызывает тепловыделение, за счет которого происходит размягчение материала.

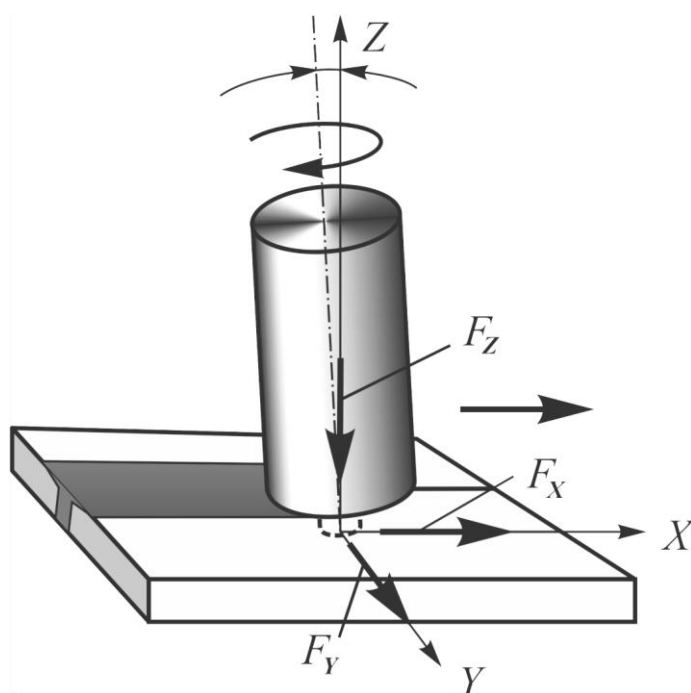


Рис.1. Принципиальная схема сварки трением с перемешиванием

Основными функциями пина являются перемешивание и перенос материала путем его экструзии между поверхностью инструмента и неразмягченным материалом, а бурта – создание избыточного давления в

зоне сварки [3]. При СТП сварочный инструмент испытывает интенсивные тепловое и силовое воздействия, которые лимитируют его срок службы, а попадание частиц износа инструмента в свариваемый материал может неблагоприятно сказываться на качестве сварного соединения.

Разработка моделей и методик проектирования и изготовления специальных сложнопрофильных инструментов, обладающих как эффективными перемешивающими свойствами, так и высокой стойкостью, является одной из актуальных задач подготовки производства в процессах СТП.

Одним из основных элементов, обеспечивающих качественную сварку трением, является применение инструмента из специальных сверхтвердых материалов (вольфрамовые, кобальтовые сплавы, кубический нитрид бора), имеющих низкую теплопроводность, высокую теплостойкость и устраняющих его схватывания со свариваемым материалом для реализации массопереноса за счет деформационной составляющей силы трения, обеспечиваемой специальной геометрией инструмента. Параметры геометрии инструмента, состоящего из пина и бурта, должны обеспечивать не только качество сварного соединения, создавая требуемые условия термопластической деформации и массопереноса, но и его стойкость, прочность, минимальную силу внедрения инструмента при его введении в свариваемый стык.

Материал инструмента должен иметь высокую жаростойкость, твердость и жаропрочность, сопротивление изнашиванию, низкую теплопроводность. В особой мере это относится к материалам инструмента, предназначенного для сваривания сталей, титановых и никелевых сплавов и др. Для повышения качественных характеристик инструмента иногда используют технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий. На поверхностях пина и бурта выполняют специальные профильные нарезки, обеспечивающие управление течением пластифицированного материала. Форма бурта может быть плоской, вогнутой или конической. Для СТП могут применяться сварочные инструменты с вращающимся буртом, со стационарным буртом, катушечные, с конусным пином, с изменяемой длиной пина, без пина.

Для модельных экспериментов и отработки условий сварки трением с перемешиванием были разработаны 3D модели инструментов различной конфигурации. Конструкция инструмента рассчитывалась по специальной методике с учётом обеспечения отсутствия в сварном шве дефектов, ухудшающих прочностные свойства получаемого соединения: пустоты сварного шва, дефект задержки оксида, непровар в корне шва. Моделирование вязкотекучих процессов перемешивающей сварки трением выполнялось с использованием приложения COSMOS FloWORKS. В проекте сварки трением данная программа использовалась для

определения результата воздействия твёрдого тела (инструмента) на вязкопластичную среду (свариваемый материал) (рис. 2). Спроектированные модели инструментов подвергались прочностному анализу в системе SolidWorks – COSMOSWORKS.

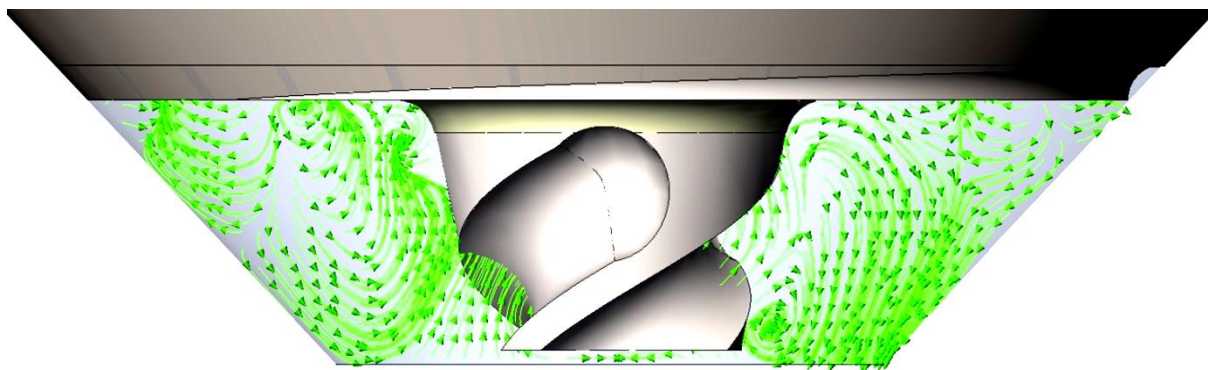


Рис. 2. Моделирование воздействия твёрдого тела (инструмента) на вязкопластичную среду (свариваемый материал)

Экспериментальная отработка высокоскоростной СТП проводилась с использованием сварочного инструмента с различной формой рабочей части, в частности, со спиральной нарезкой, параболической и гиперболической формой [3]. В процессе исследований было определено, что при использовании инструмента с малым диаметром бурта объема пластифицированного металла может оказаться недостаточно для полного заполнения освобождающегося позади инструмента пространства, что приведёт к образованию в швах дефектов в виде непроплавки. Чрезмерно большой диаметр бурта способствует формированию широкой лицевой поверхности шва, значительному короблению сварных соединений и образованию дефектов вследствие перегрева металла в зоне сварки. Установлено, что для перемешивающей сварки трением алюминиевых сплавов толщиной 1,5...2,5 мм оптимальный наружный диаметр бурта инструмента должен находиться в пределах 10...15 мм. Кроме того, для обеспечения стабильности формирования швов на торцевой поверхности бурта необходимо делать небольшое кольцевое углубление, обеспечивающее плавное и непрерывное перемещение пластифицированного металла и формирование качественной лицевой поверхности шва. Среди изготовленных инструментов опытным путём выбирали наиболее оптимальный, способный производить соединение с наибольшими прочностными характеристиками. Для этого каждый инструмент испытывался при определённом сочетании режимов сварки (числа оборотов и скорости подачи).

Опытные испытания показали, что наиболее оптимальной формой в производственных условиях является сложная геометрия, сочетающая в себе спиралевидные канавки круглого сечения двух видов шага и диаметра (рис. 3), отлично зарекомендовавшая себя в сварке алюминиевых сплавов 2...5 мм, в том числе конструкций сложной геометрической формы. На основе разработанной конструкции были спроектированы и изготовлены инструменты для сварки образцов различной толщины, обеспечивающие сваривание образцов в соответствии с требованиями чертежей заказчика.

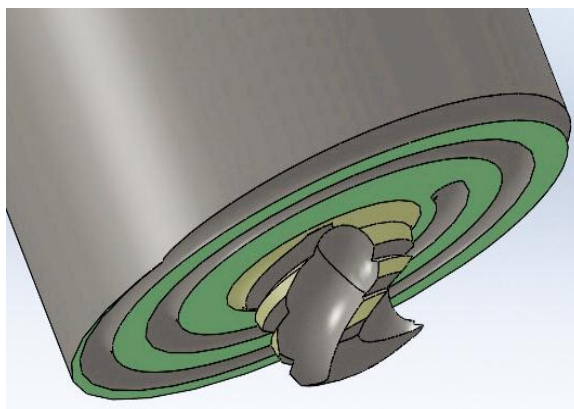


Рис. 3. Модель расположения спиральных канавок инструмента для СТП с рабочей частью спиралевидной формы конструкции ОАО «ВНИИАЛМАЗ»

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) является наиболее подходящим методом для изготовления сложнопрофильных инструментов для СТП, выполненных из высокотвердых материалов. Оснащение оборудования специализированными устройствами ЧПУ, адаптированными к условиям ЭЭО, позволяет реализовать процесс со сложными кинематическими движениями.

При реализации частной схемы ЭЭО – электроэрозионного фрезерования (ЭЭФ) рабочей части инструмента [4] применялись электроды в форме диска – для получения малой винтовой канавки (МВК), цилиндрического стержня – для получения большой винтовой канавки (БВК) и спирали на профилированном основании бурта. Рабочая часть заготовки инструмента на данной операции представляет собой форму гладкого конуса. Расположение осей электрода-инструмента и заготовки под соответствующим углом ω и совмещение поступательного и вращательного движений обеспечивают формирование МВК с заданными шагом, глубиной и диаметром (рис. 4, а, б). Геометрия пина инструмента получается последующим формообразованием БВК на предварительно

сформированном профиле МВК и формированием спирали на опорном бурте (рис. 4, в, г).

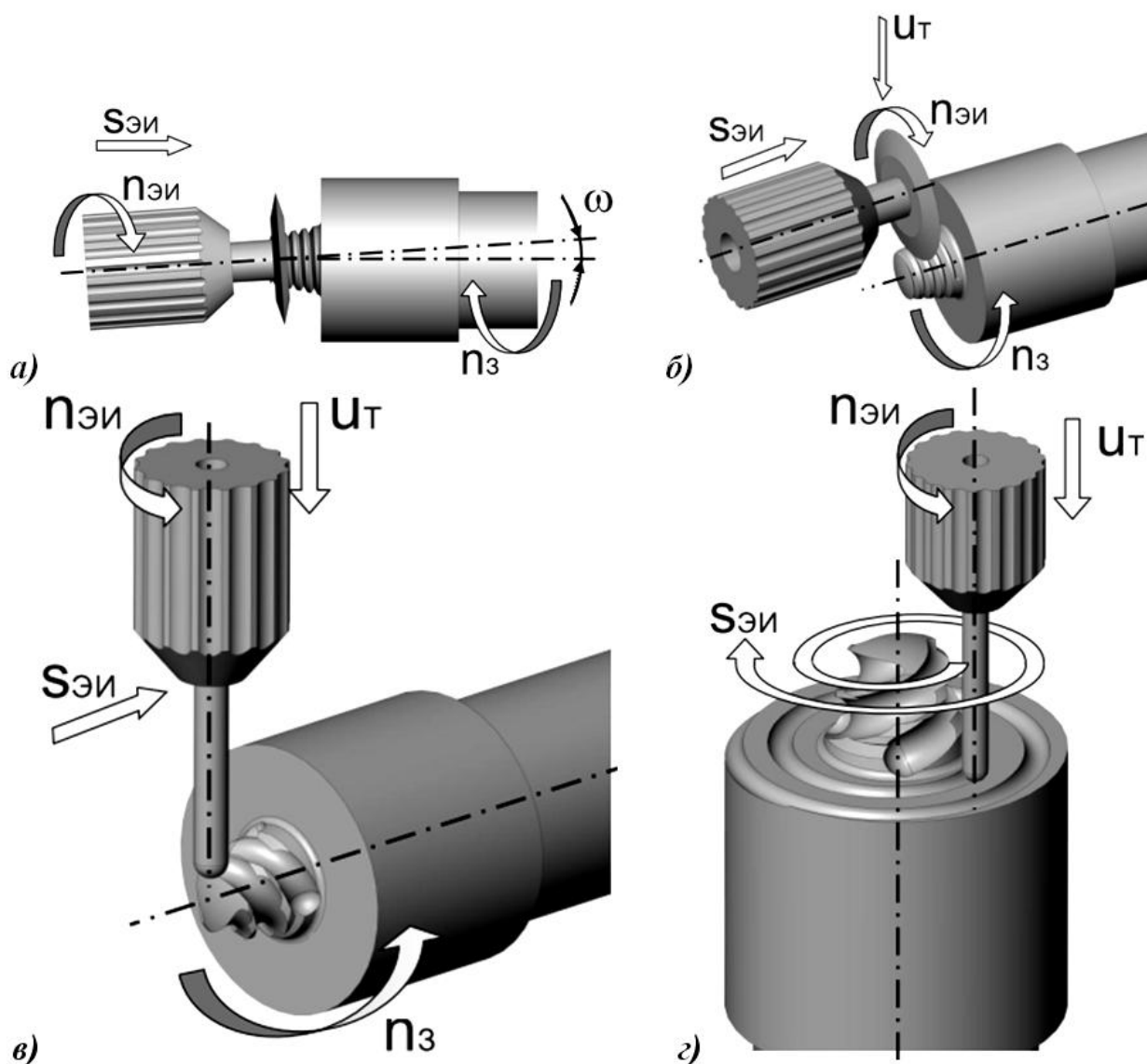


Рис. 4. Технологические схемы формообразования геометрии инструмента ЭЭФ:
 а – формирование МВК; вид сверху, б – работа следящей системы;
 в – формирование БВК; г – формирование спирали на опорном бурте

Следящая система U_T обеспечивает равномерный съем материала на профиле МВК. По прошествии заданного числа проходов производится контроль геометрии винтовых канавок. Припуск на чистовую обработку снимается на «мягких режимах» установки. Финишный проход выполняется на режимах установки, обеспечивающих требуемую шероховатость поверхности и качество поверхностного слоя пина.

При необходимости производится правка профиля электрода-инструмента, восстанавливающая исходную геометрию (характерно для дискового электрода), в результате его незначительного износа в процессе

обработки. Технологическая схема ЭЭФ для формирования рабочей части пина и бурта инструмента СТП была реализована на установке ELFA–731, оснащенной системой ЧПУ класса CNC «Fanuc-3M» с применением оригинального программного обеспечения генерирования управляющего кода [5]. Изготовленные инструменты для сварки образцов различной толщины представлены на рис. 5.

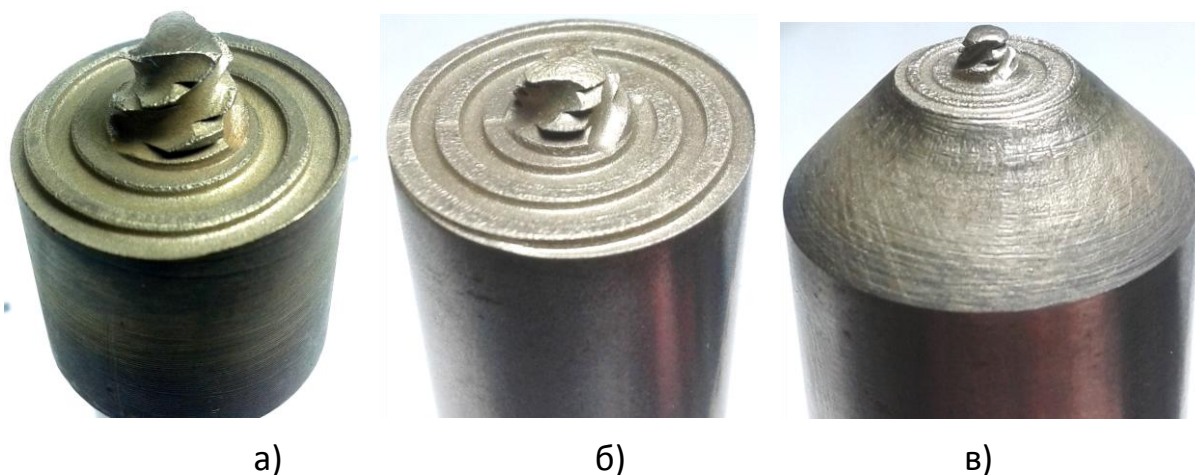


Рис. 5. Сложнопрофильный инструмент для сварки трением с перемешиванием, полученный методом ЭЭФ для ПСТ листового материала толщиной соответственно: а – 8 мм; б – 4 мм; в – 2 мм

Имеется тенденция расширения применения ЭЭО в инструментальном производстве, особенно в опытно-конструкторском. ЭЭО дает значительный выигрыш за счет снижения трудоемкости подготовки производства, универсальности, высокой точности. Преимуществом ЭЭО является то, что при ее использовании путь от чертежа до готовой детали значительно сокращается. Это позволяет значительно ускорить производство новых образцов изделий.

Сварка трением имеет широкие технологические возможности для получения неразъемных соединений деталей узлов авиационной и ракетной техники в качестве альтернативы заклепочным соединениям, контактной, шовной электродуговой, электронно-лучевой и лазерной сваркам, обеспечивает возможность сварки разнородных материалов. По мнению ведущих мировых экспертов, данный процесс является революционным в области сварки листовых материалов из легких сплавов (алюминиевых и магниевых). Эту технологию считают ключевой для создания авиационной техники пятого поколения.

Выводы

Выполненные исследования по оптимизации конструкции инструмента для сварки трением с перемешиванием позволили установить эффективные геометрические формы рабочей части и приобрести практический опыт изготовления сложнопрофильного инструмента методом ЭЭФ. По результатам проведенных экспериментальных

исследований и опытной эксплуатации спроектированного оборудования можно сделать следующие выводы:

1. Опытные испытания показали, что наиболее оптимальной формой в производственных условиях является сложная геометрия рабочей части инструмента, сочетающая в себе спиралевидные канавки круглого сечения двух видов шага и диаметра.

2. На основе предложенной базовой конструкции были спроектированы и изготовлены инструменты для сварки конструкций разной толщины в соответствии с требованиями производства авиационной техники.

3. Предложены новые технологические схемы ЭЭФ для формообразования рабочей части инструмента, профиль которой образован сочетанием винтовых канавок различных шага, глубины и диаметра. Данная технология изготовления позволяет получить инструмент с требуемой точностью при снижении трудоемкости и энергозатрат на обработку твердого материала.

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что предложенные конструкции инструмента для сварки трением с перемешиванием позволяют получить качественное соединение при меньших нагрузках на конструкцию оборудования. Развитие инструментального производства открывает новые возможности перемешивающей сварки трением, особенно применительно к материалам с высокой температурой плавления.

Список литературы

1. Бойцов А.Г. Сварка трением с перемешиванием / А.Г. Бойцов, В.В. Качко, Д.Н. Курицын // РИТМ (Ремонт Инновации Технологии Модернизация). – 2013. – № 10 (88). – С. 38-44.

2. Патент 2393071 C1 RU. МПК В23К20/12. Способ сварки трением с перемешиванием и инструмент для сварки трением с перемешиванием / А.Г. Бойцов, В.В. Качко. Патентообладатель ОАО «ВНИИАЛМАЗ». Опубл. 27.06.2010.

3. Качко В.В. Влияние технологических факторов высокоскоростной перемешивающей сварки трением на качество получаемых соединений / В.В. Качко, Д.Н. Курицын, А.Г. Бойцов // Научные труды (Вестник МАТИ). – 2012. – Вып. 19 (91). – С. 156-162.

4. Бойцов А.Г. Технологические схемы электроэрозионной обработки сложнопрофильного инструмента для сварки трением с перемешиванием / А.Г. Бойцов, Д.Н. Курицын, Л.В. Денисов // Научные труды (Вестник МАТИ). – 2014. – № 23 (95). – С. 99-110.

5. Денисов Л.В. Программа генерирования управляющего кода для FANUC 3М ЧПУ систем на основе двумерного чертежа формата DXF / Л.В. Денисов, М.В. Грачев, А.С. Пискарев // Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010614432. Правообладатель Денисов Л.В. Заявка №2010612656; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 7 июля 2010 г.

УДК: 621.224:621.313.322-82

НАПРАВЛЕННОЕ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ФОРМОЙ НЕРАВНОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

В. В. Курицына

МАТИ имени К.Э. Циолковского, г. Москва, Россия

Тел. (8495) 915-52-93, tpdla@mail.ru

Представлены результаты комплексных исследований, направленных на выявление возможностей технологического управления параметрами точности формообразования ответственных деталей агрегатов управления двигателей летательных аппаратов прогрессивными методами направленного поверхностно-пластического деформирования алмазным индентором.

Ключевые слова: технологический процесс, пневмогидросистемы, отклонение формы, локальное поверхностное пластическое деформирование, алмазный индентор.

THE DIRECTED SURFACE-PLASTIC DEFORMATION IN THE FORM REGULATION OF NOT EQUAL RIGIDITY DETAILS

V.V. Kuritsyna

Russian State University of Aviation Technology, Moscow, Russia

In work results of the complex researches directed on revealing of opportunities of technological management in parameters of accuracy of formation of responsible details of units of management of engines of flying devices by progressive methods of directed superficial - plastic deformation diamond indenter are submitted.

Keywords: technological process, pnevmo-hydrosystems, form deviation, local surface plastic deformation, diamond indenter.

Проблема технологического обеспечения качества дорогостоящих ответственных деталей особенно актуально проявляется на современном

этапе развития авиационного и ракетного двигателестроения, где непрерывно возрастают масштабы применения прецизионных деталей сложных конструктивных форм, неравномерной жесткости, тонкостенных. Широкое распространение получают различного рода гидроусилители и сервоприводы, выносные и встроенные силовые цилиндры, сложнопрофильные детали. Прецизионные детали пневмогидравлических систем (ПГС) управления работают в специфических условиях, характеризующихся одновременным воздействием различных эксплуатационных факторов, которые могут изменяться в широком диапазоне: от криогенных до высоких температур, высоких рабочих давлений, динамических нагрузок (вибраций, ударов, тряски и т.п.).

Интенсификация производства обострила проблему изготовления класса высоконагруженных деталей из особо прочных и жаропрочных конструкционных материалов, имеющих сложную форму и высокие требования к ее точности.

Цилиндрические корпусные детали ПГС по конструкторско-технологическому признаку можно отнести к группе неосесимметричных деталей и охарактеризовать как изотропные оболочки неравной жесткости как по длине, так и по сечению (рис. 1). Механической обработке подвергаются внутренняя цилиндрическая и частично наружная поверхности.

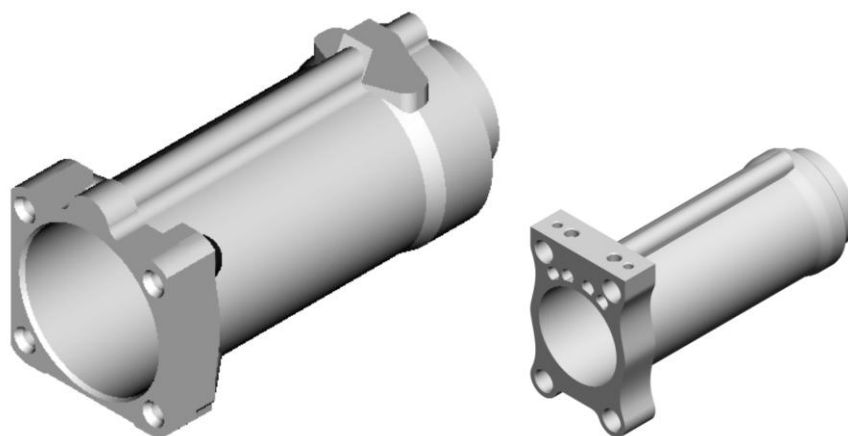


Рис. 1. Модели корпусных деталей пневмогидросистем

Основным препятствием повышению качества и производительности изготовления деталей сложной конфигурации являются деформации, возникающие от действующих сил при различных видах технологического воздействия. Заготовки деталей, имея различную жесткость или температурные деформации в разных точках, под действием сил обработки или нагрева получают в ходе технологического процесса или эксплуатации различные перемещения, вызывающие погрешности формы готовых

деталей. Неравномерная жесткость детали может привести в ходе технологического процесса к возникновению погрешности формы в виде отклонения от прямолинейности оси корпуса и отклонения от круглости центрального отверстия (рис. 2). Отклонения формы деталей, получаемые под действием различных факторов на протяжении технологического процесса изготовления, имеют тенденцию устойчивого сохранения в течение всего процесса обработки. Это обусловливается явлением технологического наследования. При этом некоторые характеристики и свойства переходят от операции к операции, они как бы наследуются от предыдущей обработки.

Обеспечение высокой точности формы корпусных деталей вызывает необходимость ужесточения требований к технологическому процессу и разработки новых прогрессивных технологических процессов, таких, как локальное поверхностное пластическое деформирование (ЛППД), заключающееся в целенаправленном воздействии на процесс формообразования цилиндрических мало жестких прецизионных деталей.

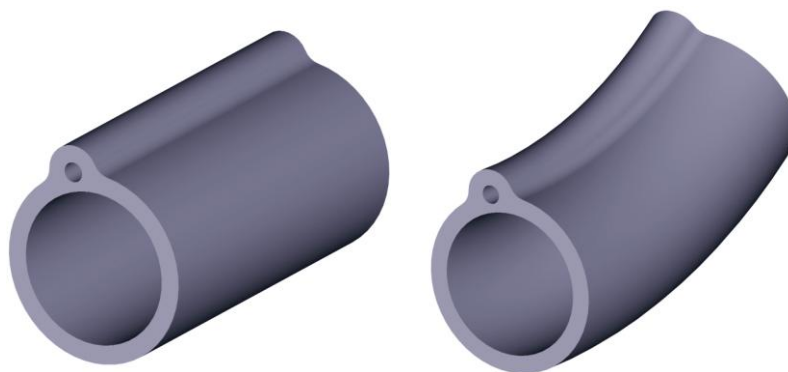


Рис. 2. Модель коробления деталей
неравномерной жесткости

Любая система, рассматриваемая с позиции наследования, содержит большое число регуляторов [2, 3]. Работа наследственных регуляторов, присущих технологическим системам, является мощным фактором обеспечения требуемых выходных параметров и повышения надежности работы высокоточных деталей. Теоретическое и экспериментальное исследование методов, интенсифицирующих обработку традиционными и специальными комбинированными методами направленного воздействия, позволит управлять процессом технологического наследования, с тем, чтобы свойства, положительно влияющие на надежность детали, сохранять в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно, ликвидировать в его начале [4].

Большими потенциальными возможностями обладают методы локального воздействия на деталь технологической энергии различной физической природы (деформации, снятие материала, нанесение

покрытий, модификация потоками энергии и др.). Предлагаемые прогрессивные методы локального поверхностного пластического деформирования способствуют интенсификации управления производственными процессами формообразования и доводки прецизионных деталей.

Особая роль в формировании качества и эксплуатационных свойств деталей принадлежит обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД), к которой относятся процессы обкатывания поверхностей шариками, роликами, алмазными инденторами и др. [5]. Эффективным методом повышения прочности поверхностного слоя деталей является алмазное выглаживание, связанное с образованием остаточных напряжений сжатия, повышением твердости, несущей способности поверхности, коррозионной стойкости. Преимущества методов ППД в технологии обработки обуславливаются их высокоэффективным силовым воздействием на поверхностный слой обрабатываемой детали и высокой производительностью. Им присуща более высокая гибкость в технологическом управлении качеством поверхности, т.к. включены в работу такие средства технологического воздействия, как силовые, температурные и др.

Анализ различных методов ППД показал, что для рассматриваемых деталей и материалов, из-за присущей им высокой поверхностной твердости, достигающей HRC=56-65 единиц, обеспечиваемой операциями термической и химико-термической обработки, лишь алмазные инденторы приемлемы в качестве инструмента для отделочной обработки. Твердость деформирующих элементов, использующихся при других методах ППД, вполне соизмерима, а в некоторых случаях даже уступает поверхностной твердости деталей прецизионных пар. При контактном давлении, равном пределу текучести материала детали, осуществляется пластическая деформация в зоне контакта. При этом происходит не только упрочнение выглаженного слоя, но и формирование выгодных при эксплуатации остаточных напряжений сжатия.

Связь параметров канавки с параметрами процесса деформирования алмазным индентором можно представить в виде:

$$P_y = 0,38 \cdot \frac{\pi \cdot R_{сф} \cdot H_{\mu} \cdot h_k}{f \cdot K_k}, \quad (1)$$

где P_y – усилие выглаживания, Н; $R_{сф}$ – радиус сферы алмазного индентора, мм; H_{μ} – микротвердость исходной поверхности, МПа; h_k – глубина канавки, мм; f – коэффициент трения по обрабатываемому материалу; K_k – коэффициент, учитывающий влияние шага между канавками (для одиночной канавки $K_k = 1,0$).

В силу специфики (наиболее высокая твердость деформирующего инструмента, малая площадь пластического контакта инструмента с

деталью) в наилучшей степени для целей локальной обработки поверхностей пригодно ЛППД алмазным индентором.

Механизм влияния локальной поверхностно-пластической обработки на геометрические характеристики деталей в различных аспектах рассмотрения различен и имеет две разновидности:

1. Изменение геометрии поверхности за счет перераспределения материала поверхностного слоя при пластическом деформировании во время образования канавок (рельеф поверхности).

2. Наведение остаточных напряжений в приповерхностной зоне образования канавки, которые, в свою очередь, способны вызывать общую деформацию детали или ее элемента (маложесткие, тонкостенные детали), а также способны изменить жесткость детали без изменения ее конструктивных форм.

Таким образом, применение локального или управляемого поверхностного пластического деформирования позволяет управлять геометрическими характеристиками поверхностей за счет целенаправленного перераспределения материала поверхностного слоя детали, уменьшая волнистость, а также путем создания поля остаточных напряжений, способных осуществить направленную деформацию детали, уменьшающую имеющееся отклонение формы. Сущность методов ЛППД состоит в нанесении серии разнообразных канавок алмазным индентором на рабочие и, возможно, нерабочие поверхности обрабатываемых деталей. Локальность и управляемость процесса заключаются в специальных методиках выбора режимов нанесения канавок, что подразумевает выбор места и регулярности их нанесения, интенсивности нагрузки, радиуса индентора. Особого внимания заслуживает метод управления формой цилиндрических деталей, основанный на локальном поверхностном пластическом деформировании детали алмазным индентором.

Принцип ЛППД основан на возникновении остаточных напряжений в поверхностной зоне материала детали при пластическом деформировании поверхности. Специальное распределение остаточных напряжений может вызвать деформации тонкостенных неравножестких деталей (рис. 3).

Основная идея метода ЛППД при управлении формой деталей кольцевого и цилиндрического типов состоит в проведении на нерабочей поверхности деталей одной или нескольких канавок алмазным индентором вдоль образующей (рис. 4).

При этом образуется локальное поле сжимающих остаточных напряжений, эквивалентное системе сосредоточенных нормальных и тангенциальных нагрузок, а следовательно, обладающее большой деформативной способностью; возникает направленная общая упругая деформация детали. Эффект исправления отклонения формы от круглости достигается за счет уравнивания локальных остаточных напряжений в

поверхностном слое детали, сопровождающегося ее общей упругой деформацией, поле перемещений которой противоположно полю отклонения формы от номинала детали до воздействия ЛППД. Данный метод обладает рядом преимуществ (низкая энергоемкость, высокая производительность, применение универсального широко распространенного оснащения).

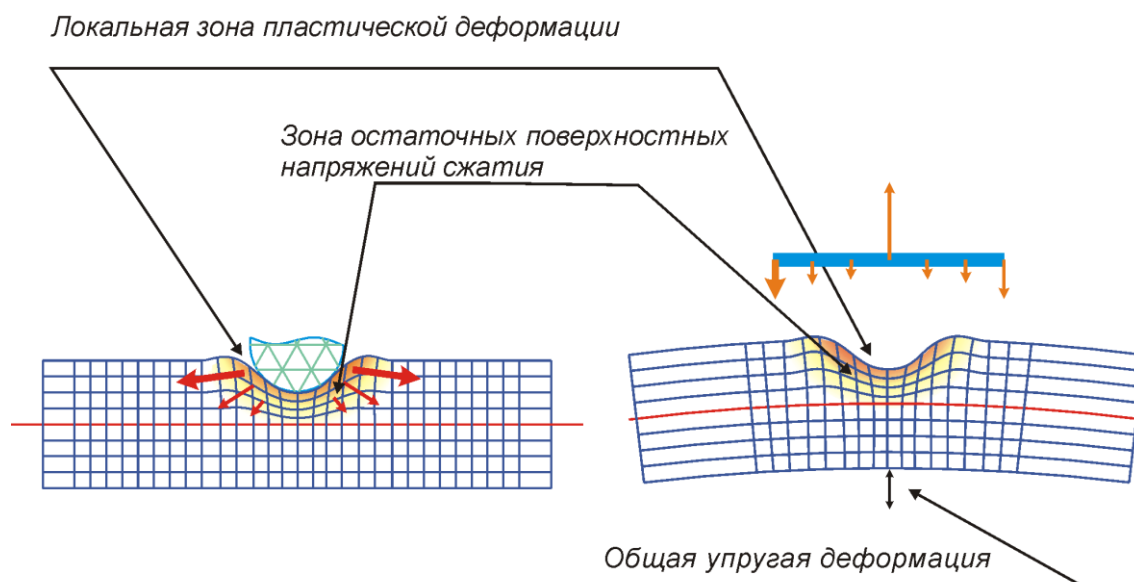


Рис. 3. Схема ЛППД тонкостенной плоской пластины

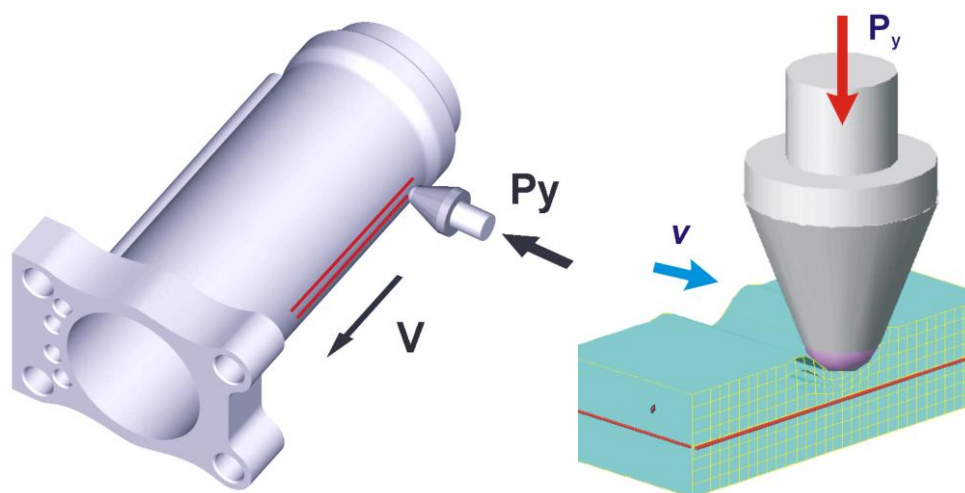


Рис. 4. Схема ЛППД цилиндра алмазным индентором

Большая степень локализации пластической деформации обеспечивает высокую разрешающую способность метода, что выражается в точности регулирования воздействия (сила вдавливания, дискретность расположения канавок) и точности получаемого результата (геометрия общего деформирования).

Локальное поверхностно-пластическое деформирование может проводиться на токарно-винторезных станках моделей 16К20 и 1И611П. Инструментом служат наконечники из природных (ОН-037-103-67) и синтетических (АСПК, АСПК-3) алмазов со сферической рабочей частью $R_{сф} = 1,0-3,5$ мм. Усилие на алмазном наконечнике при формообразовании одной канавки не превышает 1000 Н. Используется смазочно-охлаждающая жидкость – масло.

При определении места воздействия и режимов ЛППД для тонкостенных деталей неравномерной жесткости применяется численный анализ упругого напряженно-деформированного состояния образцов, подвергнутых воздействию единичных силовых нагрузок, эквивалентных эффекту действия остаточных напряжений после локального поверхностного пластического деформирования. При расчете действие локальных остаточных напряжений представляется как приложение сосредоточенной силы, направленной по нормали от поверхности. Метод конечных элементов в форме метода перемещений является базой для разработанной системы моделирования, вполне отвечает требованиям надежности получения необходимого результата при повторении синтезированного теоретического эксперимента на практике в реальных условиях. Описывающие уравнения математической модели получаем путем минимизации полной потенциальной энергии рассматриваемой системы, выраженной через поле перемещений. При решении задачи упругого деформирования рассматриваем тело заданной формы, материал которого имеет известные физико-механические свойства. На тело действуют заданные нагрузки и наложены некоторые связи, определяются напряжения, деформации и перемещения в теле. Уравнения модели описывают равновесие узлов системы; искомыми неизвестными могут являться компоненты узловых перемещений при заданных параметрах силовых факторов или параметры локального воздействия (сила давления, место приложения и т.д.) при заданном поле требуемых перемещений. Оценка отклонения профиля от круглости осуществляется путем спектрального анализа, который основан на представлении профиля в виде ряда периодических функций (ряд Фурье) и реализуется с помощью гармонического анализа. Спектральное представление позволяет, с одной стороны, получить комплексную характеристику отклонений, с другой стороны – провести детальный анализ отклонений формы от круглости в любом частотном диапазоне.

Более широкие технологические возможности ЛППД открываются при применении оборудования с ЧПУ, что позволяет изменять силу воздействия алмазного индентора на деталь по заданной программе, а также задавать сложные траектории движения инструмента. Перспективным представляется применение технологии локального поверхностно-пластического деформирования в управлении формой и

распределением остаточных напряжений тонкостенных маложестких деталей, таких как упругие лепестки газодинамических подшипников, применяемых в авиационных узлах и агрегатах [6, 7]. При значительном упрочнении и уровне сжимающих остаточных напряжений, указанный метод позволяет сформировать модифицированный слой максимально близко к обрабатываемой поверхности при обеспечении высокой точности формы. Интересные возможности комбинированных технологий управления формой и физико-механическими параметрами поверхностных слоев ответственных деталей открываются при транспонировании локального поверхностного технологического воздействия применительно к методам электрофизической обработки. Так, метод электроискрового легирования в сочетании с алмазным выглаживанием можно рассматривать как эффективное технологическое средство формоизменения тонкого листового материала за счет формирования остаточных напряжений [7, 8]. В этом случае наряду с формоизменением представляется возможным регулировать эпюру контактных давлений лепестка газодинамического подшипника. Само покрытие может быть использовано как в этом направлении, так и в целях обеспечения износостойкости такого рода деталей.

Сочетание методов направленного технологического воздействия и авторских автоматизированных систем моделирования поведения детали [4, 7, 9] позволяет с наибольшей эффективностью использовать такие преимущества этого метода, как высокая производительность, низкая энергоемкость, низкая стоимость, безотходность, применение универсального технологического оснащения.

Выводы

Технология локального поверхностного пластического деформирования алмазным индентором позволяет с высокой точностью управлять процессом формообразования высокоточных поверхностей вращения деталей различной конфигурации, а также в значительной степени уменьшать отклонения формы рабочих поверхностей от круглости, полученные в ходе производства или эксплуатации маложестких кольцевых и цилиндрических деталей.

Применение предлагаемого метода в качестве финишной операции позволило на расчетных режимах ЛППД уменьшить изгиб оси гидроцилиндра на $30 \div 40$ мкм, некруглость рабочих поверхностей корпуса и колец на $50 \div 80$ мкм, что обеспечивает требование по точности изготовления прецизионных корпусов гидроагрегатов до 0,01 мм при исключении из технологического процесса трудоемких доводочных и притирочных операций. При этом характер технологического наследования отклонений формы изменился в сторону интенсивного уменьшения данного отклонения и устойчивого сохранения полученных изменений. Эффект исправления отклонений формы достигает $60 \div 80\%$.

Детали после ЛППД устойчивы к релаксации напряжений и колебаниям температуры.

Преимуществами предлагаемой технологии являются экологическая чистота, высокая производительность, доступное оборудование, быстрая организация производства и переналаживаемость. Метод целесообразно применять для наиболее ответственных деталей в случаях, когда традиционная технология не обеспечивает требуемого уровня эксплуатационных свойств или является чрезмерно трудоемкой и дорогой. Данная технология разработана для применения в области авиационно-космической техники и транспортного машиностроения.

Список литературы

1. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др.; под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.
2. Хворостухин Л.А. Управление параметрами качества прецизионных деталей двигателей летательных аппаратов / Л.А. Хворостухин, В.В. Курицына // Полет. – 2007. – № 10. – С. 19-28.
3. Курицына В.В. Обеспечение качества ответственных деталей гидроагрегатов поверхностно-пластическим деформированием / В.В. Курицына // Технология машиностроения. – 2012. – № 10. – С. 32-37.
4. Курицына В.В. Инструментальные средства MatLab Simulink в системе технологического менеджмента качества точного машиностроения / В.В. Курицына, Д.С. Лиокумович, М.В. Силуянова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2012. – Т. 8. – № 1. – С. 22-31.
5. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
6. Ковалев А.П. Моделирование прогиба нежестких тонкостенных деталей под действием локального пластического деформирования / А.П. Ковалев, А.В. Мартынюк // Технология машиностроения. – 2012. – № 10. – С. 53-56.
7. Мартынюк А.В. Расчет остаточных деформаций тонкостенных деталей после локального пластического деформирования / А.В. Мартынюк // Научные труды (Вестник МАТИ). – 2012. – № 19 (91). – С. 176-181.
8. Ковалев А.П. Формирование остаточных напряжений в тонкостенных деталях нанесением электроискровых покрытий / А.П. Ковалев, М.В. Грачев // Авиационная промышленность. – 2012. – № 3. – С. 8.
9. Курицына В.В. Автоматизированная система оценки несущей способности поверхностного слоя деталей авиакосмической техники / В.В. Курицына, М.В. Грачев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2012. – Т. 8. – № 2. – С. 44-49.

ИЗНОС ПРАВЯЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРАВКЕ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ

В.И. Малышев¹, С.В. Мурашкин², Е.А. Даньшина¹

¹ ТГУ, г. Тольятти, Россия

Тел. (8482) 539285; E-mail rsi-tgu@tltsu.ru

² ОАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти, Россия

Тел. (8482) 218073; E-mail SV.Murashkin@yandex.ru

Приведены результаты сравнительного исследования износа правящего инструмента и удельной производительности ультразвуковой и обычной правки абразивного круга.

Ключевые слова: абразивный круг, ультразвуковая правка, износ правящего инструмента, удельная производительность, смазочно-охлаждающая жидкость, сила правки.

WEAR OF DRESSING TOOL IN THE ULTRASONIC DRESSING OF ABRASIVE WHEELS

V.I. Malyshev¹, S.V. Murashkin², E.A. Danshina¹

¹ Togliatti State University, Togliatti, Russia

Tel. (8482) 539285; E-mail rsi-tgu@tltsu.ru

² JSC «AVTOVAZ», Togliatti, Russia

Tel. (8482) 218073; E-mail SV.Murashkin@yandex.ru

It is given comparative study results of dressing tool wear and specific capacity of abrasive wheel ultrasonic and conventional dressing.

Keywords: abrasive wheel, ultrasonic dressing, dressing tool wear, specific capacity, cutting fluid, dressing force.

Одним из важнейших показателей технико-экономической эффективности операций шлифования является износостойкость алмазных правящих инструментов (ПИ). Повышенный износ ПИ увеличивает экономические затраты, связанные с его заменой, и снижает стабильность выходных показателей процесса шлифования, обеспечение которой важно для условий серийного и массового автоматизированного производства. В частности, в массовом производстве ОАО «АВТОВАЗ» на операциях шлифования деталей автомобилей при достижении площадки износа на вершине алмаза правящего инструмента свыше 0,5...1,0 мм² его вынуждены заменять новым из-за ухудшения режущей способности круга, заправленного затупившимся ПИ.

Применение в автоматизированном производстве технологии ультразвуковой правки (УЗП) абразивных кругов, позволяющей повысить

эффективность операций шлифования, ограничивается недостаточной изученностью динамики износа алмазного правящего инструмента, совершающего дополнительные колебания ультразвуковой частоты [1, 2, 3].

Исследование влияния энергии ультразвуковых колебаний на износ ПИ в процессе правки проводили на торцекруглошлифовальном станке мод. 3Т161. Инструментом служил правящий карандаш, оснащенный поликристаллическим алмазом в виде цилиндра диаметром 1,4 мм. Такая форма алмазного поликристалла обеспечивала постоянство его рабочей поверхности и линейного износа ПИ. Правку круга 1–750х80х305 92А40НСМ27К11 ГОСТ 2424-83 (~92А46L7V ГОСТ Р 52781-2007) выполняли на постоянном режиме: скорость круга $V_k = 45$ м/с; продольная подача ПИ $S_{\Pi} = 0,05$ м/мин; глубина правки $t = 0,02$ мм/дв.ход; амплитуда A и частота f колебаний ПИ соответственно составляли: $A = 13$ мкм; $f = 22,3$ кГц.

Было выполнено две серии сравнительных экспериментов, в которых определяли износ правящего инструмента как при УЗП, так и при ОП. Первая серия с подачей смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), а вторая при правке всухую. В качестве СОЖ использовали 2,5 % –ную эмульсию Укринол-1. После каждой серии правок на специальном приспособлении измеряли линейный износ рабочей части ПИ с точностью $\pm 0,001$ мм.

Результаты экспериментов, представленные на рис. 1, дают основание полагать, что ультразвуковая правка по сравнению с обычной обеспечивает снижение линейного износа алмазов как с подачей СОЖ, так и без неё. Благодаря этому, улучшается основной технико-экономический показатель процесса правки – удельная производительность, выражаемая отношением объёма снятого абразивного материала круга к массе износа алмазоносного правящего поликристалла.

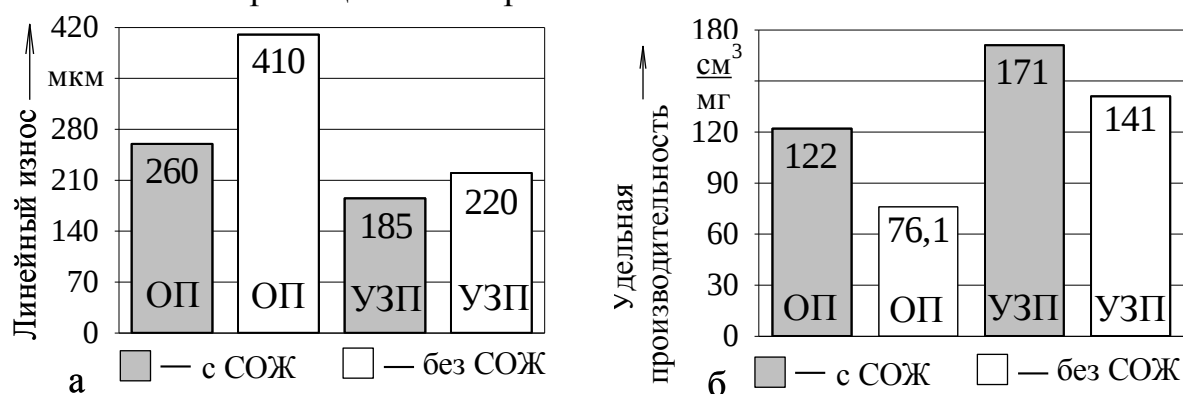


Рис. 1. Сравнительные технико-экономические показатели: а – линейный износ рабочей части ПИ; б – удельная производительность правки круга

Как видно из рис. 1, УЗП с точки зрения износостойкости правящего инструмента более эффективна, поскольку удельная производительность

УЗП с подачей СОЖ оказалась примерно в 1,4 раза выше, чем после ОП. Износ ПИ при обычной правке без подачи СОЖ резко увеличился, и разница в удельной производительности стала более ощутимой - возросла до 1,85 раза.

Повышение износостойкости ПИ в процессе УЗП круга связано с наложением на правящий инструмент ультразвуковых колебаний, при которых силовое взаимодействие вершины алмаза с рабочей поверхностью круга (РПК) изменяется от максимальной величины до нуля. Это обстоятельство, а также периодическое изменение скорости резания создают благоприятные условия работы ПИ по разрушению абразивных зерен, что значительно снижает среднюю силу правки (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что амплитуда ультразвуковых колебаний правящего инструмента оказывает значимое влияние на среднее значение составляющей P_y силы правки. В процессе ОП ($A = 0$ мкм) сила P_y имеет максимальное значение (~ 14 Н). С увеличением амплитуды до 6...8 мкм следует интенсивное снижение силы P_y правки до значений 4...5 Н с последующей ее стабилизацией при $A = 10...12$ мкм. В итоге значение силы P_y при УЗП оказалось примерно в 4 раза меньше, чем при ОП. Отметим, что снижение составляющей P_y силы правки в исследованном диапазоне A соответственно отражается на уменьшении составляющей P_z (по нашим экспериментальным данным $P_z = 0,2...0,25 \cdot P_y$), являющейся главным источником температуры в зоне правки.

Согласно [4], контактные температуры в зоне правки, измеренные с помощью искусственной закладной термопары, при УЗП круга снижаются на 15...20 % по сравнению с ОП. Поскольку алмаз ограничен предельно допустимой температурой 700...800°C, обусловленной его теплоустойчивостью, то снижение рабочей температуры на 100...160 °C, вследствие колебательного характера контактного взаимодействия с РПК и снижения составляющей P_z силы правки, и обеспечило снижение износа его рабочей части при УЗП.

Испытания в основном производстве ОАО «АВТОВАЗ» подтвердили возможность повышения эффективности операций шлифования за счет ультразвуковой правки абразивных кругов на автоматизированном станочном оборудовании. Получены результаты, свидетельствующие о повышении стабильности параметра Ra и точности

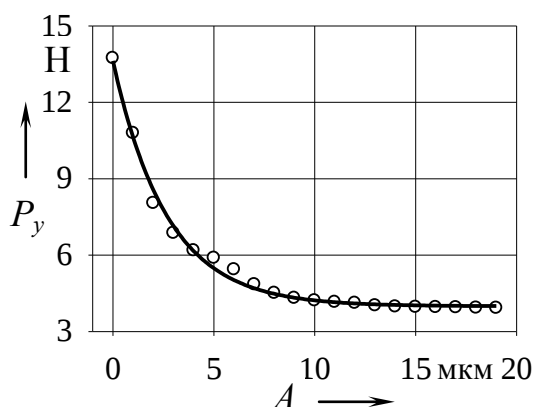


Рис. 2. Влияние амплитуды A колебаний ПИ на составляющую P_y силы правки: $\circ$ – эксперимент; — – аппроксимация

размеров шлифованных деталей независимо от степени износа рабочей поверхности ПИ [3]. Применение УЗП круга вместо ОП позволило снизить расход ПИ и обеспечить его надежную эксплуатацию до полного износа, увеличив тем самым его ресурс работы. Так, в результате внедрения технологии УЗП и специального правящего инструмента на операции окончательного шлифования вторичного вала «наружное окончательное шлифование места под шестерню 1-й передачи, места под центральной подшипник и место под шестерню заднего хода», ресурс работы алмазной правящей гребенки увеличился до 70 раз, расход шлифовальных кругов уменьшился в 3 раза, число проходов правящего инструмента уменьшено в 2 раза, период стойкости шлифовального круга повысился в 1,9 раза, глубина правки снижена в 1,7 раза, подача правящего инструмента вдоль образующей круга повышена на 13 %.

За счёт снижения удельного времени правки шлифовального круга в 4,2 раза штучное время обработки на данной операции уменьшилось на 18 %.

Выводы

1. Режущая способность шлифовальных кругов становится относительно «независимой» от состояния «затупления» рабочей части правящего инструмента (исключается влияние износа рабочей части правящего инструмента на рельеф круга).

2. Ресурс работы алмазной гребенки возрастает от 1,5 до 4 раз. Брак (наладочный + технологический) на операциях шлифования в среднем снижается до 15 %.

В целом, преимущество УЗП перед традиционной безвибрационной правкой зависит от многих технологических условий шлифования, но на большинстве освоенных технологических операций отмечена повышенная износостойкость правящего инструмента в 1,5...3,0 раза по сравнению с установленным нормативом, а также его способность работать до полного износа, что обеспечивает снижение затрат на правящий и шлифовальный инструмент.

Список литературы

1. Вологин М.Ф. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке / М.Ф. Вологин. – М.: Машиностроение, 2003. – 264 с.

2. Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки рациональным использованием энергии ультразвукового поля / Е.С. Киселев. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.

3. Малышев В.И. Влияние ультразвуковой правки шлифовальных кругов на качество шлифованных поверхностей в условиях автоматизированного производства / В.И. Малышев, С.В. Мурашкин, А.Н. Попов // Вектор науки ТГУ. – 2010. – № 3. – С. 101-105.

4. Малышев В.И. Измерение контактных температур при правке шлифовального круга / В.И. Малышев, Р.В. Комлев, А.С. Селиванов // Вектор науки ТГУ. – 2009. – № 6. – С. 26-29.

УДК 621.98.043

ЛОКАЛЬНОЕ АЛМАЗНОЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

А.В. Мартынюк

МАТИ имени К.Э. Циолковского, г. Москва, Россия

Тел. (8495) 915-52-93, tpdla@mail.ru

Исследованы особенности формирования упрочненного слоя в тонкостенных деталях под влиянием локального поверхностного пластического деформирования алмазным индентором. Предложены рекомендации по назначению оптимальных режимов для модифицирования поверхностного слоя тонкостенных деталей, создания регулярного микрорельефа поверхности.

Ключевые слова: газодинамический подшипник, тонкостенные детали, поверхностный слой, алмазное выглаживание, индентор, упрочнение, локальное поверхностное деформирование, микрорельеф.

LOCAL DIAMOND IRONING OF THIN-SLAB FLEXIBLE PARTS

A.V. Martynyuk

Russian State University of Aviation Technology, Moscow, Russia

Features of forming hardened layer in thin-slab parts during the local surface plastic warping by diamond indenter have investigated. Recommendations to destination optimum modes for modifying of a blanket of thin-walled details, creation of a regular microrelief of a surface are offered.

Keywords: gasodynamic bearing, thin-slab details, surface layer, diamond ironing, indenter, hardening, local surface warping, microrelief.

В авиационных узлах и агрегатах широкое применение находят тонкостенные упругие детали большой податливости. Например, в лепестковых газодинамических подшипниках (ЛГП) скольжения основным рабочим элементом является упругий лепесток определенной формы. В данной работе рассматриваются возможности модифицирования поверхностного слоя подобных деталей методом локального поверхностного пластического деформирования алмазным индентором (ЛПД АИ). При значительном упрочнении и уровне сжимающих

остаточных напряжений указанный метод позволяет сформировать модифицированный слой максимально близко к обрабатываемой поверхности, что немаловажно для тонкостенных деталей. В данном случае тонкостенными считаются детали, толщина которых соизмерима с глубиной модифицированного слоя при ЛППД АИ. Использование в качестве инструмента природного алмаза вызвано в первую очередь уникальностью его свойств: наибольшая известная твердость, модуль упругости и минимум дефектов кристаллической решетки в целом позволяют обеспечить высокое качество и геометрию рабочей поверхности, также природный алмаз, по сравнению с синтетическим алмазом, корундом или твердым сплавом, обладает более низким коэффициентом трения и, что очень важно при выглаживании, низкой степенью адгезии к обрабатываемому материалу [1-2].

Целью исследований явилось выявление влияния режимов и условий обработки тонкостенных деталей методом ЛППД АИ на картину возникающих при этом внутренних напряжений, на изменение формы поперечного сечения обработанного участка с целью разработки рекомендаций по назначению режимов ЛППД АИ для получения требуемых характеристик поверхностного слоя тонкостенных деталей.

При обработке методом ЛППД использовались природный и синтетические алмазные инденторы сферической формы с радиусами 0,5; 1,0; 2,0; 3,5 мм. Обрабатываемый материал – немагнитный коррозионно-стойкий сплав 36НХТЮ, в состоянии поставки закален ($HV = 2,4-2,5$ ГПа) – в дальнейшем сырой; термически обработанный по режиму закалка и дисперсионное твердение ($HV = 3,8-4$ ГПа) – в дальнейшем термообработанный. Толщина образцов 0,1 и 0,15 мм. В данной работе рассматриваются тонкостенные детали, т.е. толщина которых меньше или равна радиусу инструмента. В качестве инструмента в экспериментах использовался алмазный сферический индентор (в дальнейшем просто индентор или АИ) из синтетического алмаза АСПК и природного. Использовались подложки: твердая, т.е. материал подложки тверже обрабатываемого материала (ВК8, $HV = 15-16$ ГПа; синтетический алмаз АСПК, $HV = 100-150$ ГПа), и мягкая – материал подложки мягче обрабатываемого (сталь 20, $HV = 1,6-1,8$ ГПа). Нанесение канавок с использованием плоской подложки или, если в качестве подложки применяется аналогичный алмазный индентор другого радиуса, это асимметричная схема выглаживания (рис. 1, а). Если радиусы кривизны подложки (R_p) и индентора (R_i) равны, схема выглаживания симметричная (рис. 1, б).

Особенность алмазного выглаживания тонкостенных маложестких деталей состоит в необходимости использования поддерживающего основания или подложки. Свойства, качество и форма поверхности самой подложки будут оказывать значительное влияние на картину напряженно-

деформированного состояния в зоне обработки, соответственно и на окончательные свойства обработанных деталей. Поэтому суммарное внедрение индентора в тонкостенный образец (h_{Σ}) включает в себя деформацию подложки (рис. 2):

$$h_{\Sigma} = h_{\Sigma(\text{дет})} + h_{\Sigma(\text{под})} = h_{\text{упр}(\text{дет})} + h_{\text{ост}(\text{дет})} + h_{\text{упр}(\text{под})} + h_{\text{ост}(\text{под})}, \quad (1)$$

где $h_{\Sigma(\text{дет})}$, $h_{\text{упр}(\text{дет})}$, $h_{\text{ост}(\text{дет})}$ и $h_{\Sigma(\text{под})}$, $h_{\text{упр}(\text{под})}$, $h_{\text{ост}(\text{под})}$ – суммарное, упругое, остаточное внедрение индентора в материал детали и материал подложки соответственно. В данном случае деформацией индентора пренебрегаем вследствие ее малости по сравнению с масштабом деформаций детали и подложки.

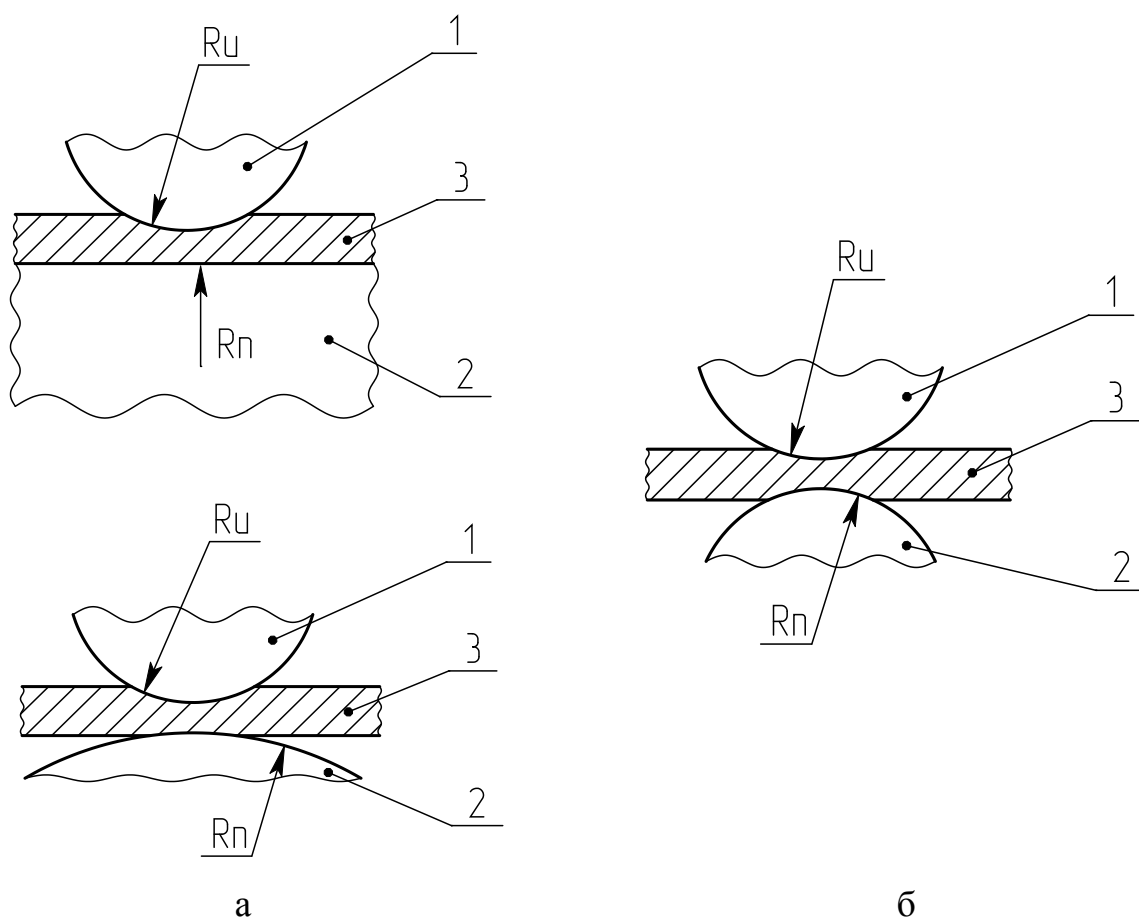


Рис. 1. Асимметричные $R_p \neq R_i$ (а) и симметричная $R_p = R_i$ (б) схемы обработки ЛППД АИ: 1 – индентор; 2 – подложка; 3 – обрабатываемая деталь

В связи с этим рассматриваются два случая: 1) обработка на мягкой подложке, тогда $h_{\Sigma(\text{дет})} \ll h_{\Sigma(\text{под})}$; 2) обработка на твердой подложке, тогда $h_{\Sigma(\text{дет})} \gg h_{\Sigma(\text{под})}$ (см. рис. 2). В первом случае канавка формируется в сочетании с изгибом детали вокруг индентора, при этом утонение ее сводится к минимуму, что подтвердил эксперимент. Во втором случае формирование канавки происходит за счет течения материала детали

вокруг индентора и подложки, при этом изменяется микроструктура, тем самым достигается лучшее упрочнение [3]. Микроструктура и профилограммы канавки представлены на рис. 3, 4.

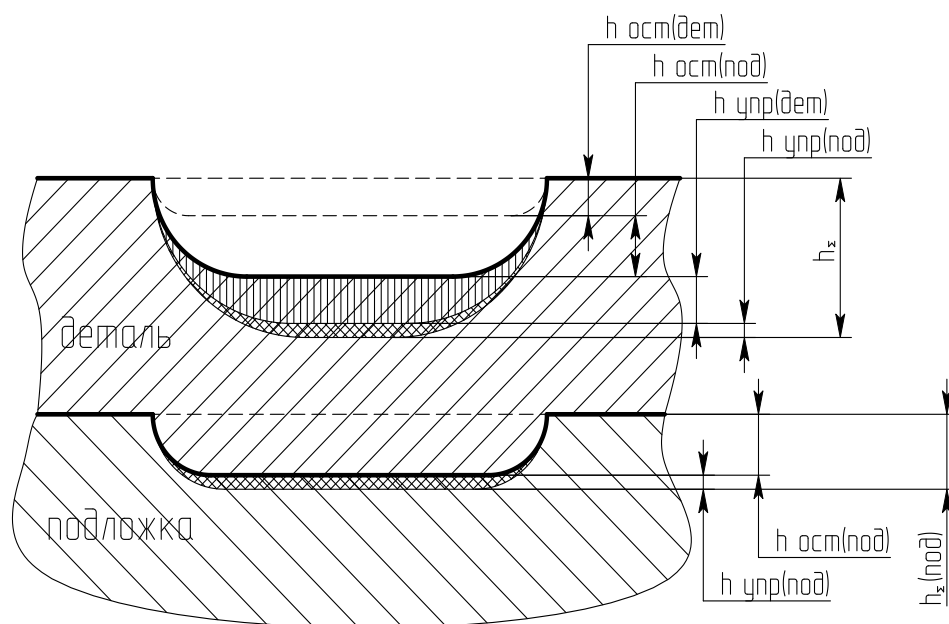


Рис. 2. Поперечный разрез канавки, нанесенной АИ, и асимметричная схема совместной деформации тонкостенной детали и подложки при ЛППД АИ

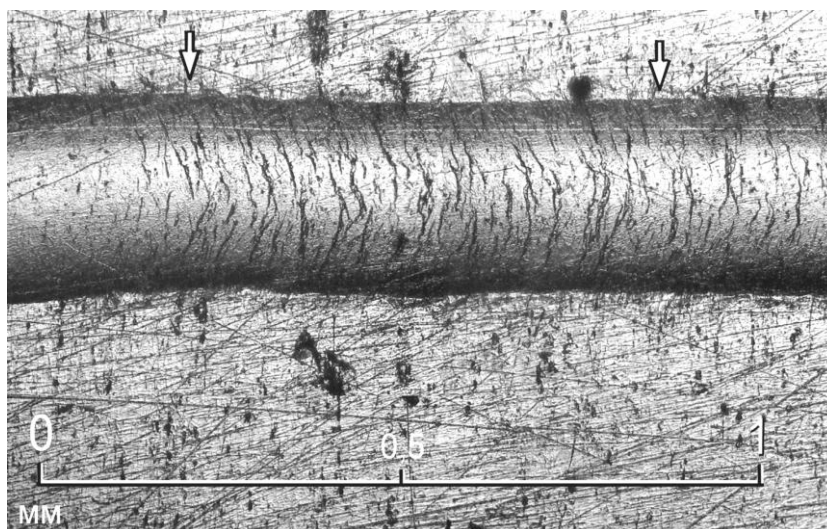


Рис. 3. Изменения микроструктуры материала дна канавки в результате ЛППД АИ. Канавка проведена поперек направления проката $R_i = 0,5$ мм (природный), $R_{\text{выгл}} = 190$ Н, твердая подложка, образец термообработанный

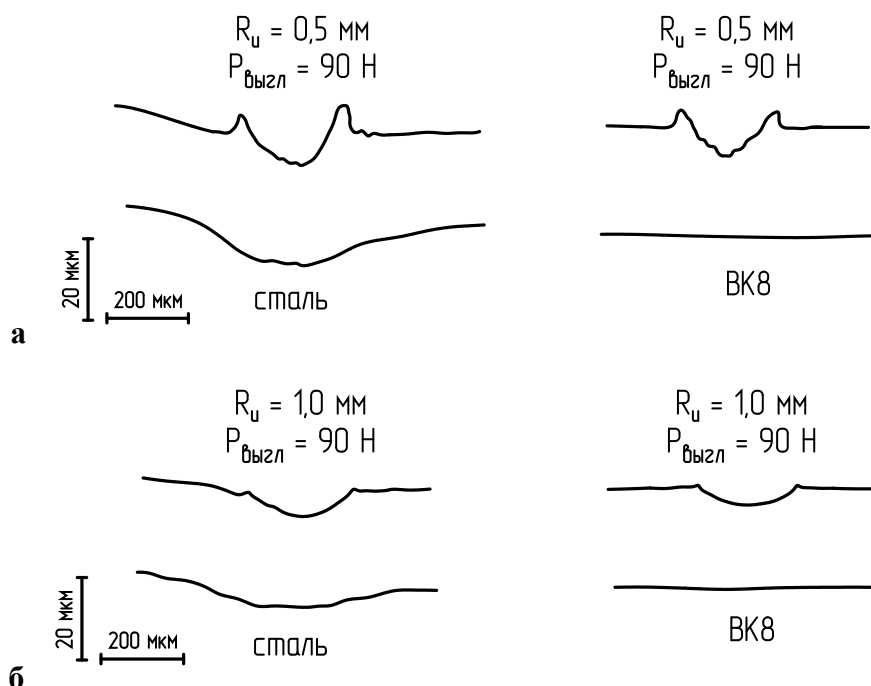


Рис. 4. Профилограммы дна канавки и обратной стороны для радиусов индентора 0,5 мм (а) и 1,0 мм (б), мягкой (сталь) и твердой (BK8) подложек

Относительное утонение детали в процессе обработки, рассчитанное по данным профилографирования поперечного сечения канавки и обратной стороны детали, служит косвенным показателем ее упрочнения.

При симметричной схеме значительно изменяется соотношение остаточной глубины внедрения и ширины отпечатка/канавки вследствие меньшей площади контакта и, соответственно, больших контактных давлений. Следовательно, деталь в области обработки имеет большее утонение и большее упрочнение, сосредоточенное у поверхности (рис. 5).

В результате силового воздействия индентора в поверхностном слое детали возникает сложное напряженно-деформированное состояние [4, 5]. Условия контакта на границах инструмент-деталь-подложка непосредственно влияют на распределение напряжений во время формирования канавки и после снятия нагрузки [6, 7].

Из работ [1, 2], посвященных алмазному выглаживанию, известно, что чем меньше площадь контакта при той же силе сдавливания и прочих равных условиях, тем ближе к поверхности располагается очаг пластических деформаций и тем более неоднородно напряженное состояние в области контакта. Опыт показал, что известные формулы, определяющие глубину упрочненного слоя в зависимости от радиуса индентора, суммарного внедрения и ширины контактной площадки, применимы и для тонкостенных деталей, но требуют некоторых поправок. Моделирование процесса вдавливания алмазного сферического инструмента в фольгу при изменении технологических параметров

методом конечных элементов (МКЭ), а также замеры микротвердости поверхности детали после ЛППД позволили выявить появление второго очага пластической деформации на обратной стороне детали, противоположной выглаживанию, при достижении определенного значения силы сдвливания.

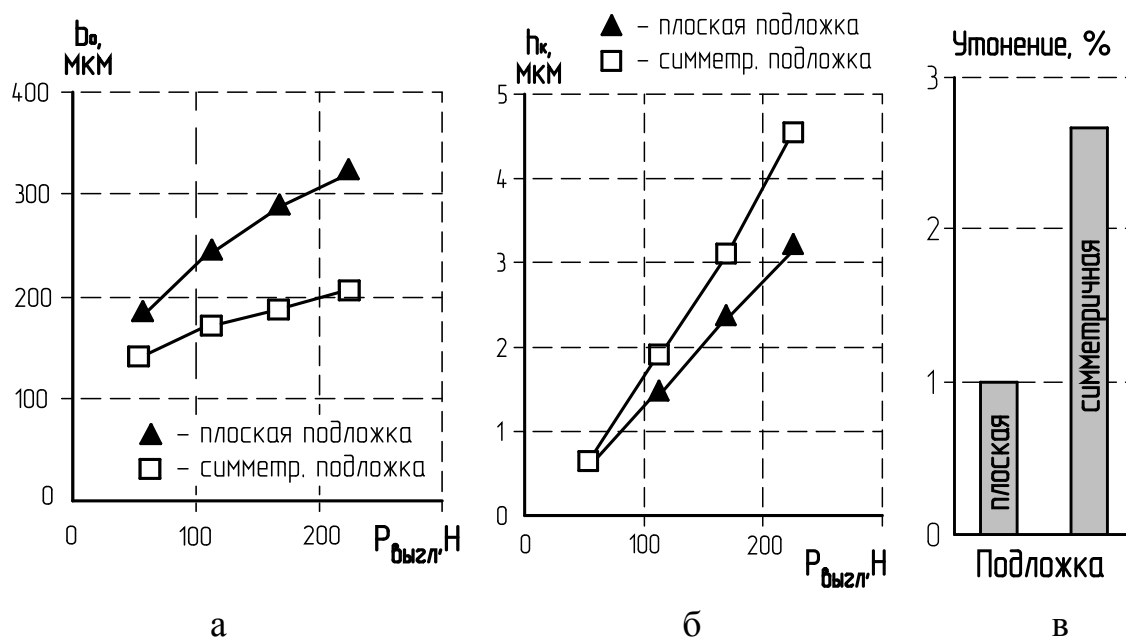


Рис. 5. Остаточные ширина (а), глубина (б) канавок и относительное утонение (в) пластин 36НХТЮ толщиной 0,15 мм, при симметричной (подложка – сферический алмаз) и асимметричной (подложка – плоская плита ВК8) схемах обработки $R_i=3,5$ мм

Микротвердость средней части данного участка в поперечном сечении выше микротвердости дна канавки, что, возможно, указывает на более интенсивное течение материала на границе деталь-подложка.

Поверхностная деформация при ЛППД АИ приводит к образованию сдвигов в зернах, искажению кристаллической решетки, изменению формы и размеров зерен, что косвенно влияет на величину микротвердости (H_V) обработанной и необработанной поверхностей. По картине распределения H_V на поверхности и в глубине детали возможно судить о размерах и форме деформированного объема. Известно, что интенсивность наклепа, следовательно и H_V , тем выше, чем меньше исходная плотность дислокаций кристаллической решетки материала до обработки. По данным экспериментов, сырые образцы имеют прирост микротвердости поверхности канавки на 20 – 23% относительно исходного состояния материала. Для термически обработанных пластин данный прирост составил 11 – 13%. Использование твердой подложки позволяет значительно (на 10 – 11%) увеличить H_V поверхности при прочих равных условиях.

По данным расчетов (МКЭ), а также результатам экспериментов получена зависимость глубины упрочненного слоя от ширины контактной площадки (рис. 6):

$$h_{yc} = C_V \cdot b_o^{k_V}, \quad (2)$$

где h_{yc} – глубина упрочненного слоя;
 b_o – ширина контактной площадки детали-индентор; C_V и k_V – коэффициенты, характеризующие влияние геометрии и твердости контактных поверхностей на глубину упрочненного слоя.

Из графика видно, что при уменьшении толщины обрабатываемой методом ЛППД детали (при прочих равных условиях) увеличивается глубина и уменьшается ширина деформированного объема.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что распространение модифицированного слоя в глубину тонкостенной детали при ЛППД АИ имеет нелинейный характер и зависит от соотношения радиуса кривизны инструмента и толщины обрабатываемой детали, а также и от параметров подложки. Полученные результаты позволяют назначать границы режимов ЛППД АИ для модифицирования поверхностного слоя тонкостенных деталей, создания регулярного микрорельефа поверхности. На основании выявленной картины деформации в детали при ЛППД АИ упрощается расчет градиента остаточных напряжений в поверхностном слое.

Метод ЛППД АИ позволяет сформировать модифицированный слой тонкостенных маложестких деталей максимально близко к поверхности. При этом достигаются значительные упрочнение и уровень сжимающих остаточных напряжений, что немаловажно для ответственных высоконагруженных деталей узлов и агрегатов авиационной техники.

Технология локального деформирования алмазным индентором

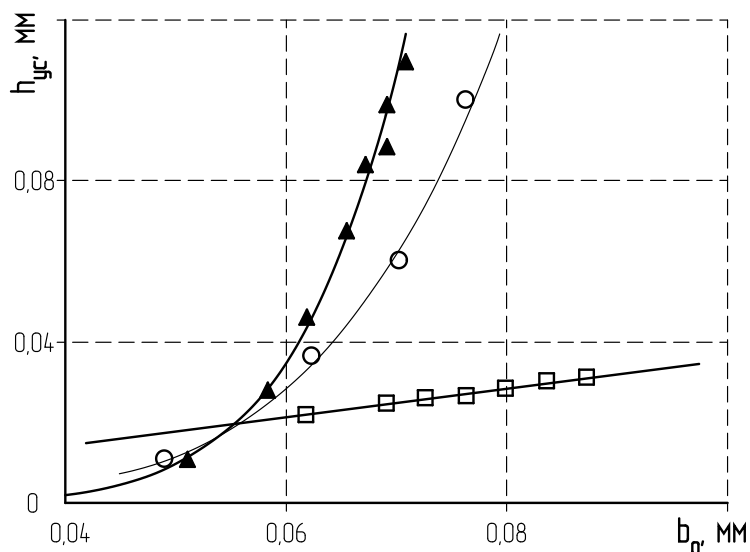


Рис. 6. Зависимость глубины упрочненного слоя h_{yc} от ширины площадки контакта b_o индентора радиусом $R_{и}=0,5$ мм с деталью: ▲ – для тонкостенной детали $h_{плл}=0,15$ мм, твердая подложка; ○ – для тонкостенной детали $h_{плл}=0,5$ мм, твердая подложка; □ – для толстостенной заготовки

является безотходной, достаточно проста для реализации, так как не требует специального оборудования, высокопроизводительна.

Список литературы

1. Обработка металлопокрытий выглаживанием / Л.А. Хворостухин, В.Н. Машков, В.А. Торпачев, Н.Н. Ильин. – М.: Машиностроение, 1980. – 63 с.
2. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, А.П. Ковалев, Р.А. Ишмаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.
3. Ковалев А.П. Контактно-фрикционное взаимодействие при поверхностном пластическом деформировании / А.П. Ковалев, А.В. Мартынюк // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 8. – С. 14-22.
4. Хворостухин Л.А. Управление параметрами качества прецизионных деталей двигателей летательных аппаратов / Л.А. Хворостухин, В.В. Курицына // Полет. – 2007. – № 10. – С. 19-28.
5. Курицына В.В. Обеспечение качества ответственных деталей гидроагрегатов поверхностно-пластическим деформированием / В.В. Курицына // Технология машиностроения. – 2012. – № 10. – С. 32-37.
6. Мартынюк А.В. Особенности упрочнения при алмазном выглаживании тонкостенных деталей / А.В. Мартынюк, А.С. Пискарев // Научные труды (Вестник МАТИ). – 2013. – № 20 (92). – С. 169-177.
7. Ковалев А.П. Технологические особенности формообразования деталей из тонкостенного листового материала / А.П. Ковалев, М.В. Грачев // Научные труды (Вестник МАТИ). – 2010. – № 17 (89). – С. 176.

УДК 621.9.048.7

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОНЦЕВОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Г.К. Мулдашева, И.В. Злобина, А.П. Петровский, Н.В. Бекренев

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Тел. (8452) 998635; E-mail tmm@sstu.ru

На основе совместного рассмотрения уравнения Эйлера для критической силы и зависимости осевой силы сверления от технологических режимов, диаметра инструмента и параметров ультразвука получено выражение, позволяющее теоретически определить максимально допустимую по критерию продольной устойчивости подачу

при обработке различных конструкционных материалов с известной зависимостью предела прочности от температуры.

Ключевые слова: сверление, ультразвук, высокопрочные материалы, продольная устойчивость, прямолинейность отверстия, критическая сила.

THEORETICAL JUSTIFICATION OF INCREASE OF LONGITUDINAL STABILITY OF THE TRAILER TOOL AT ULTRASONIC PROCESSING OF OPENINGS OF SMALL DIAMETER

G.K. Muldasheva, I.V. Zlobina, A.P. Petrovsky, N.V. Bekrenev

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

On the basis of joint consideration of the equation of Euler for the critical force and dependence of axial force of drilling on technological modes, diameter of the tool and parameters of ultrasound the expression allowing theoretically to define the most admissible by criterion of longitudinal stability giving at processing of various constructional materials with known dependence of strength from temperature is received.

Keywords: drilling, ultrasound, high-strength materials, longitudinal stability, straightforwardness of an opening, critical force.

Для современных и перспективных деталей приборо- и агрегатостроения характерно применение высоколегированных сталей и сплавов, отличающихся наряду с коррозионной и жаростойкостью повышенной прочностью и упругостью [1]. Обработка конструкционных, особенно – высокопрочных, материалов мелкоразмерным (диаметром 1 – 8 мм) концевым инструментом: свёрлами, развертками, метчиками – затруднена по сравнению с крупногабаритными. Для этих инструментов характерны малая изгибная жесткость и продольная устойчивость, а также затрудненный отвод стружки. Это является причиной отклонения инструмента от заданной траектории и отклонения расположения обрабатываемой поверхности от заданного. Продольная устойчивость мелкоразмерного концевого инструмента может быть повышена за счет уменьшения действующих на него силовых факторов путем сообщения последнему ультразвуковых колебаний. В зависимости от обрабатываемого материала и параметров ультразвука, согласно экспериментальным данным [2-6], возможно уменьшение величин сил и моментов резания при сверлении и резьбонарезании от 1,5 до 3 раз, что позволяет обеспечить повышение точности образующей отверстия за счет увеличения продольной устойчивости инструмента. Однако, полученные эмпирические зависимости адекватны только в условиях проведенного эксперимента применительно к конкретным материалу детали, инструменту и технологическим режимам. На основании изложенного представляет интерес получение теоретических зависимостей,

устанавливающих связь технологических режимов, параметров ультразвука и инструмента с его продольной устойчивостью, что позволило бы назначать режимы обработки в условиях воздействия ультразвука, обеспечивающих точность отверстия в продольном сечении, при сохранении высокой производительности.

Целью нашей работы была попытка получения зависимостей для определения максимальной осевой подачи сверла по критерию сохранения его продольной устойчивости при сообщении последнему ультразвуковых колебаний, а также обоснование рекомендаций по совершенствованию геометрической формы поперечного сечения сверла для ультразвуковой обработки.

За основную гипотезу влияния ультразвука на осевую силу при сверлении принято использование эффекта резкого повышения мгновенной температуры под вершиной колеблющегося с ультразвуковой частотой инструмента, открытого А.И. Марковым [3]. Вследствие термического действия ультразвука под режущим клином возникает мгновенная температура, равная [3]:

$$\Omega = \frac{fAP_{\text{д}}}{854 \cdot \lambda \cdot R} e^{-\frac{VR}{2C}}, \quad (1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; C - теплоемкость; R - радиус-вектор точки под инструментом; V - скорость резания; f и A - частота и амплитуда ультразвуковых колебаний инструмента.

Для получения необходимых зависимостей нами введен коэффициент термической эффективности ультразвука:

$$\Delta_f = \sigma_{\Omega} / \sigma_{\sigma}. \quad (2)$$

В этом выражении σ_{σ} и σ_{Ω} - соответственно пределы прочности обрабатываемого материала при комнатной температуре и при повышенной вследствие ультразвукового воздействия. Температурные зависимости физико-механических свойств большинства материалов известны и приводятся в справочниках, т.е. $\sigma_{\Omega} = F(\Omega)$.

Из (1) и (2) следует, что снижение предела прочности будет пропорционально амплитуде ультразвуковых колебаний. Это приведет к облегчению стружкоотделения, уменьшению трения и, как следствие - снижению осевой силы, действующей на инструмент, величиной которой можно управлять, изменяя амплитуду ультразвука.

Факторы, действующие на сверло, представлены на рис. 1.

На сверло в процессе резания при сообщении ему продольных ультразвуковых колебаний будут действовать постоянная осевая сила $P_{oc} = C_P \cdot d \cdot S^{0.7}$ и переменная динамическая сила $P_{\text{д}} = 16,6 \cdot A_{\text{пр}}^{0,56}$ [3].

В этих выражениях: C_p – коэффициент силы резания, d – диаметр сверла, S – продольная подача, A_{np} – амплитуда продольных колебаний. Вследствие синусоидального характера колебаний в первом полупериоде динамическая составляющая изменяется от нуля до максимума и затем – до нуля и увеличивает нагрузку на сверло. Во втором полупериоде, действуя в противоположном направлении – уменьшает.

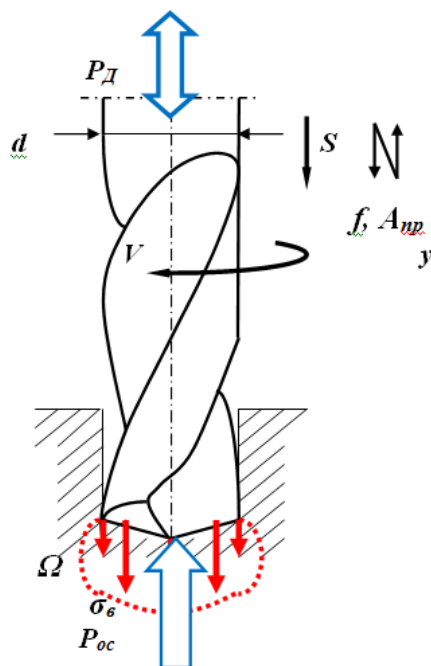


Рис. 1. Схема действия физико-механических факторов на сверло при обработке отверстия с воздействием ультразвука

Осевая сила сверления отверстий с сообщением инструменту ультразвуковых колебаний после принятия некоторых допущений и упрощений может быть определена по следующей зависимости:

$$P_{OC\Sigma} = \sqrt{0,5 \left[\left(C_p d S^{0,7} + 16,6 A_{np}^{0,56} \right)^2 + \left(C_p d S^{0,7} - 16,6 A_{np}^{0,56} \right)^2 \right] \Delta_f} . \quad (3)$$

Очевидно, что условием сохранения продольной устойчивости сверла, а значит – прямолинейности оси отверстия будет выполнение соотношения:

$$P_{OC\Sigma} \leq P_K , \quad (4)$$

где $P_{OC\Sigma}$ – суммарная осевая сила при сверлении; P_K – критическая сила, определяющая продольную устойчивость сверла.

Упрощенная модель сверла, как тонкого стержня, в зависимости от стадий данного процесса может быть представлена следующими схемами (рис. 2). Сверло, закрепленное в патроне станка, будем считать жестко закрепленным. В момент врезания вершину сверла будем считать шарнирно закрепленной. При заглублении сверла в материал его второй конец также можно считать жестко закрепленным.

Критическая сила для описанных случаев согласно [7] определяется выражениями:

$$P_K = \frac{2\pi^2 EJ}{l^2}, \quad P_K = \frac{4\pi^2 EJ}{l^2}, \quad (5)$$

где E – модуль продольной упругости материала сверла; J – момент инерции сечения сверла; l – длина сверла.

Из (5) следует, что наиболее опасным будет момент врезания (критическая сила в два раза меньше).

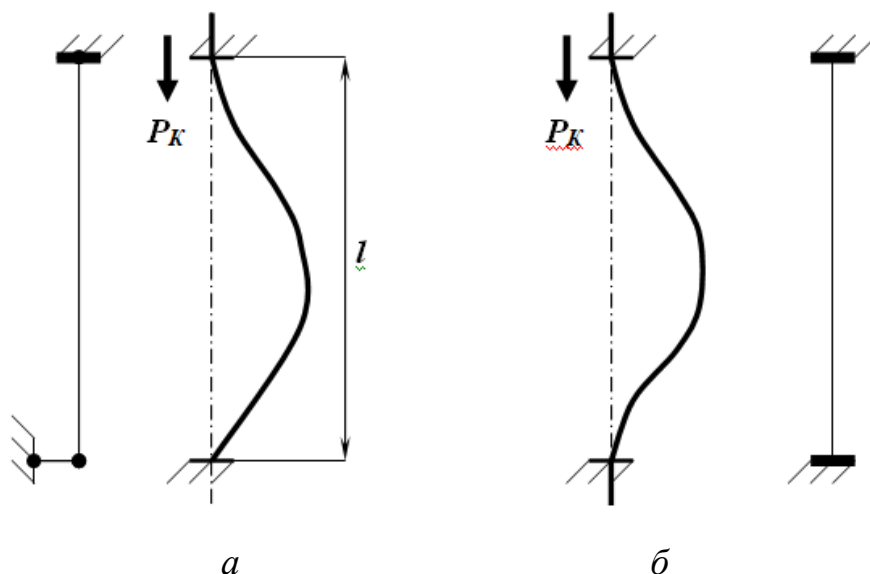


Рис. 2. Графическое представление упругой линии сверла в момент врезания (а) и в процессе сверления (б)

Используя условие (4), определим предельно допустимую по критерию продольной устойчивости подачу сверла в момент врезания при обычном сверлении:

$$C_P d S^{0,7} = \frac{2\pi^2 EJ}{l^2}. \quad (6)$$

Решая (6) относительно S , получим:

$$S = \frac{71,07 E^{1,43} J^{1,43}}{C_P^{1,43} d^{1,43} l^{2,86}}. \quad (7)$$

Для случая ультразвукового сверления будем иметь:

$$\sqrt{0,5[(C_P d S^{0,7} + 16,6 A_{np}^{0,56})^2 + (C_P d S^{0,7} - 16,6 A_{np}^{0,56})^2]} \Delta_f = \frac{2\pi^2 EJ}{l^2}. \quad (8)$$

Преобразовывая (8), раскрывая Δ_f и решая относительно S , получим выражение для предельно допустимой подачи при ультразвуковом сверлении:

$$S = \frac{(388,8\sigma_B E^2 J^2 - 275,56A^{1,12}\sigma_{B\Omega} l^4)^{0,714}}{C_P^{1,43} d^{1,43} l^{2,86} \sigma_{B\Omega}^{0,714}} . \quad (9)$$

Видно, что при $A=0$ выражение (9) приводится к (8), т.е. к случаю обычного сверления. Сравнительные расчеты для случая обработки сплава ВТЗ-1 спиральными сверлами диаметром 2,5, 5 и 10 мм показали возможность увеличения максимальной осевой подачи на 30 – 50% при сообщении сверлу ультразвуковых колебаний. При этом из (9) следует, учитывая сложную зависимость S от d , l и A , что для каждого диаметра сверла существует предельная амплитуда колебаний, при превышении которой наблюдается потеря сверлом продольной устойчивости и требуется уменьшение значения осевой подачи. Этот факт может служить еще одним критерием назначения рациональных режимов ультразвукового сверления.

Поскольку (9) включает в себя момент инерции, определяемый формой поперечного сечения сверла, возможно, задавшись максимальной величиной подачи сверла, определить форму его сечения (в конечном итоге – глубину стружечных канавок). Для упрощения расчетов модель сечения сверла может быть представлена сочетанием круга и его сегментов (рис. 3).

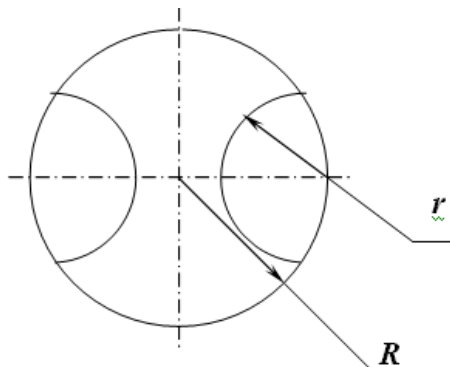


Рис. 3. Упрощенная графическая модель поперечного сечения сверла

Согласно [7] момент инерции круга с симметричными радиусными вырезами равен:

$$J = 0,5K_1 R^4 , \quad (10)$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от отношения радиуса сегмента к радиусу круга - r/R .

Из (10) будем иметь:

$$K_1 = \frac{2J}{R^4} . \quad (11)$$

В результате, зная функциональную зависимость $K_1 = \varphi\left(\frac{r}{R}\right)$, можно определить радиус поперечного сечения сегмента и, приближенно,

глубину стружечных канавок сверла, при которой при данных условиях обработки и амплитуде ультразвука будет обеспечена продольная устойчивость, а значит – прямолинейность оси отверстия.

Список литературы

1. Высокопрочные коррозионно-стойкие стали в современной авиации / под ред. А.Г. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 2006. – 656 с.
2. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
3. Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1968. – 367 с.
4. Агапов С.И. Интенсификация процесса обработки труднообрабатываемых материалов при введении ультразвуковых колебаний в зону резания: монография / С.И. Агапов. – Волгоград: ВолгГТУ, 2009. – 78 с.
5. Бржозовский Б.М. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие / Б.М.Бржозовский, Н.В. Бекренев. –Саратов: СГТУ, 2009. -348 с.
6. Марков А.И. Ультразвуковая интенсификация процессов сверления глубоких отверстий в труднообрабатываемых материалах / А.И. Марков, Н.В. Бекренев, Е.И. Ивкин // СТИН. –1996. – №12.– С. 23-27.
7. Беляев Н.М. Соппротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: Изд-во техн. лит-ры, 1958. – 856 с.

УДК 531.717

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ПУТЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ КАНАЛОВ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

А.М. Сарсенгалиев

Научный руководитель Н.В. Бекренев

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Тел. (8452) 998635; E-mail tmm@sstu.ru

Выполнен анализ ресурсной наработки горелочных устройств на ГПА на примере компрессорных станций Саратовской области. Показана целесообразность восстановления работоспособности не выработавших ресурс устройств. Проведены экспериментальные исследования по ультразвуковой очистке каналов в горелочных устройствах и установлена

принципиальная возможность применения данного метода для продления ресурса данных устройств, что позволит получить экономический эффект за счет снижения потребности в новых устройствах данного типа.

Ключевые слова: ультразвуковая технология, кавитация, газоперекачивающие агрегаты, резонанс, очистка

DETERMINATION OF TECHNICAL CAPABILITY OF MAINTENANCE THE GORELOCHNYKH OF DEVICES BY ULTRASONIC CLEANING OF CHANNELS OF POLLUTION

A.M.Sarsengaliev

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

The analysis of a resource operating time the gorelochnykh of devices on GPA on the example of compressor stations of the Saratov region is made. Expediency of maintenance of the devices which haven't developed a resource is shown. Pilot researches on ultrasonic cleaning of channels in the gorelochnykh devices are conducted and basic possibility of application of this method for extension of a resource of these devices that will allow to gain economic effect due to decrease in requirement for new devices of this type is established.

Keywords: ultrasonic technology, cavitation, gas-distributing units, resonance, cleaning.

Научная новизна подхода к решению проблемы состоит в следующем: обосновании способа ультразвуковой очистки путем возбуждения ультразвуковых колебаний в корпусе горелочного устройства на резонансных частотах в сочетании с общим кавитационным воздействием и с пульсирующей прокачкой через газоподводящие каналы и отверстия моющей жидкости; оптимизации режимов очистки на основе теоретических и экспериментальных исследований процесса кавитации в малых «скрытых» отверстиях и полости горелочного устройства с учетом его виброакустических параметров при воздействии ультразвука; разработке компьютерных моделей напряженного состояния и амплитудно-частотных виброакустических характеристик, возникающих в горелочном устройстве в процессе его очистки.

Одними из основных элементов газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на основе конверсионных газотурбинных двигателей являются камеры сгорания. Паспортными данными регламентируются определенная мощность, частота вращения ротора турбины и выбросы в окружающую среду соединений классов CO_x и NO_x. Опыт эксплуатации горелочных устройств выявил некоторые особенности применения данных систем на ГПА. Горелочные устройства имеют большое количество рабочих отверстий малого диаметра (0,8–1,0 мм), расположенных радиально в

центрального корпусе и в осевом направлении в радиально расположенных газоподводящих трубках [1]. В процессе эксплуатации выявляется нарушение требуемых параметров горения газозоудушной смеси, что связано с отложением, предположительно, соединений сопутствующих горючему газу элементов на стенках каналов и пилонов. Это вызывает повышенное газодинамическое сопротивление, что приводит к снижению фактической мощности ГПА, а также повышенному содержанию соединений СОх и NOх, что сказывается отрицательно на экологических показателях агрегата. В конечном итоге отмеченные нарушения в работе горелок отрицательно сказываются на качестве предоставляемых услуг и нарушают нормальную работу по обслуживанию газоперекачивающих агрегатов [2].

Отмеченные нарушения проявляются задолго до выработки горелкой паспортного ресурса (по опыту эксплуатации – при выработке до 6000 часов против необходимых 24000), что вызывает необходимость замены комплекта горелок на новый и дополнительные финансовые расходы (стоимость нового комплекта составляет 1144,0 тыс. руб.).

По нашему мнению, возможно решить данную проблему за счет восстановления работоспособности горелок, не выработавших паспортный ресурс, путем очистки каналов и рабочих отверстий от загрязнений.

Целью наших исследований являлось определение технической возможности восстановления работоспособности горелочных устройств путем очистки каналов от загрязнений и обоснование наиболее эффективного метода очистки для его последующей отработки и практического внедрения.

Как известно, очистка отверстий от загрязнений может производиться несколькими методами: механическими, химическими, электрофизическими [3]. В авиационном приборо- и агрегатостроении, а также в производстве топливной аппаратуры (распылители дизельного топлива) широко применяются методы ультразвуковой очистки, позволяющие эффективно удалять загрязнения средней степени твердости и прочности сцепления с основой без нарушения ее поверхности. Для очистки отверстий используются специальные системы в виде трубчатых (игольчатых) излучателей с прокачкой жидкости через канал. Такие установки были разработаны и внедрены на ряде предприятий в 70– 90-х годах XX века в Научно-исследовательском технологическом институте (в настоящее время ОАО «НИТИ-Тесар» г. Саратов). Однако их применение для решения имеющейся проблемы очистки каналов в горелках нецелесообразно по причине высокой трудоемкости раздельной очистки большого количества отверстий. Также следует учитывать технические трудности прокачки моющей среды через игольчатые излучатели очень малого диаметра, поскольку диаметры отверстий в горелках, как указывалось выше, имеют размер до 1,0 мм. Тем не менее, анализ

технической литературы и производственного опыта показывает, что ультразвуковая промывка и очистка являются наиболее универсальными и эффективными методами для удаления загрязнений с поверхности различных изделий машино- и приборостроения, в частности – карбюраторов, инжекторов, топливных форсунок и т.п.

Метод очистки влияет на количество остаточных загрязнений, остающихся на поверхности материала, следующим образом [4]: струйная очистка, промывка, ополаскивание – 85%; очистка в бензине – 70%; очистка в парах хлорированных растворителей – 65%; вибрационная очистка – 56%; кипячение в воде – 45%; ручная очистка металлическими щетками – 10%; ультразвуковая очистка – менее 2%. Таким образом, наиболее эффективным методом удаления загрязнений в нашем случае также может явиться ультразвуковой. Однако, он требует доработки с учетом отмеченных выше конструктивных особенностей объекта очистки.

На первом этапе исследовали химический состав отложений методом РЭМ+ЭДРФА при помощи растрового электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan) с энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным анализом на детекторе INCA PentaFETx3 (Oxford Instruments) для выбора наиболее эффективной моющей среды. Материалы анализа результатов исследований химического состава отложений в каналах горелочных устройств, демонтированных из двух различных ГПА, на основе усредненных по шести измерениям данных приведены на рис. 1. Видно, что химический состав отложений в первой и второй пробах принципиально отличается содержанием углерода (во второй пробе примерно в два раза меньше) и различием в составе отложений (во второй пробе отсутствуют сера, кальций, хром, марганец, но присутствует титан); в первой и второй пробах содержится примерно одинаковое количество кислорода и железа; в обеих пробах содержится относительно меньше углерода и серы по сравнению с кислородом и железом, в то же время можно отметить разнообразие металлов.

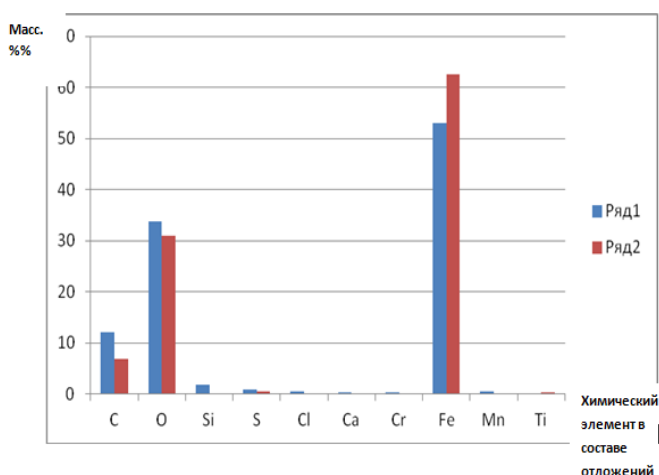


Рис. 1. Распределение химических элементов в составе отложений в двух ГПА (масс. %)

Элементы, характерные для углеводородного сырья и наиболее вероятные для присутствия в составе магистрального газа в качестве загрязнений, составляют не более 7-14 масс. % от других элементов. То

есть, причина зашлакованности отверстий и каналов в горелочных устройствах может заключаться также в продуктах взаимодействия природного газа и кислорода атмосферного воздуха, поступающего в смесь за счет эжекции, с материалом корпуса и пилонів при высоких температурах длительного нагрева. Поэтому для очистки можно использовать моющие средства, рекомендуемые для удаления продуктов химической коррозии металлов, например – «Вертолин-74». Оценка внешнего вида проблемных зон горелочных устройств осуществлялась путем фотографирования цифровой фотокамерой до и после очистки. В ходе экспериментов были получены следующие результаты. При общей очистке в ультразвуковой ванне наблюдалось видимое разрушение отложений вблизи отверстий на пилонів и уменьшение темных углеродных отложений на корпусе горелки. При этом после первого цикла очистки вода в ванне приобретала ржавый оттенок, на дне скапливался черный шлам. После замены воды и второго цикла вода становилась более светлой, количество шлама уменьшалось. После третьего цикла шлам не наблюдался, но вода сохраняла светло-ржавый оттенок. Внешний вид горелочных устройств до и после очистки представлен на рис. 2. Тем не менее, использование традиционной схемы ультразвуковой очистки с озвучиванием объема моющей среды не дало полностью положительных результатов. Поэтому были проведены постановочные опыты с использованием местного точечного воздействия на корпус горелки стержневым излучателем.

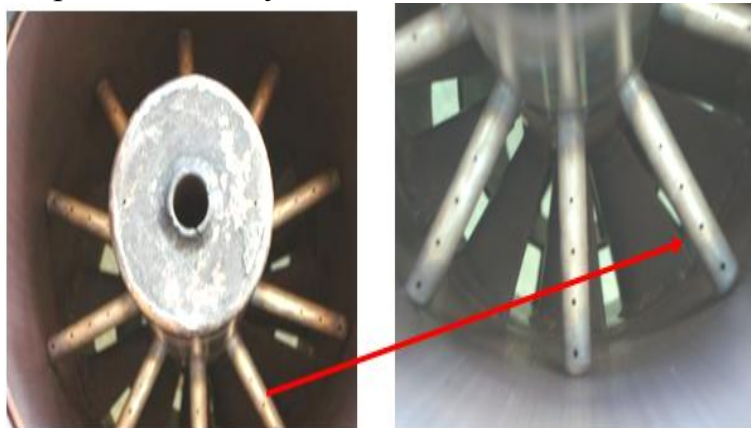


Рис. 2. Внешний вид горелочного устройства после трех циклов обработки

Кинетика набора избыточного давления воздуха, прокачиваемого через эталонное горелочное устройство и через устройства, находившиеся в эксплуатации, а также после очистки представлена на рис. 3. Степень засорения и очистки горелочного устройства

оценивали по суммарному времени набора давления в герметичном баллоне, что может косвенно свидетельствовать о расходе воздуха, и по увеличению времени набора каждой последующей ступени прироста давления. Видно, что в отличие от горелочных устройств после эксплуатации, графики, описывающие накачку давления в баллоне для очищенных горелок, имеют малый разброс значений и группируются вблизи эталонного образца.

В среднем скорость накачки через очищенные горелки всего на 3 % меньше, чем через эталонную. Горелки после эксплуатации обеспечивают существенно меньшую скорость накачки – на 23%. Таким образом, по критерию расхода прокачиваемого газа (воздуха) ультразвуковая очистка по предлагаемой схеме может обеспечить практически полное восстановление пропускной способности горелочных устройств. После обработки средняя скорость набора давления в баллоне с горелкой составила 0,045-0,05 кг/см²•с, что полностью соответствует показателям эталонного горелочного устройства.

Таким образом, экспериментальные исследования и пробные производственные испытания показали принципиальную возможность восстановления первичных параметров горелочного устройства после ультразвуковой очистки по специальной схеме с сочетанием общего и местного контактного ультразвукового воздействия.

Однако практическое использование данного метода требует дополнительных исследований и проектных работ: по изучению химического состава и распределения отложений по каналам горелочного устройства и подбору моющих сред; компьютерному моделированию влияния ультразвуковых колебаний, сообщаемых горелочному устройству, на его напряженно-деформированное состояние и акустические параметры; определению оптимальной схемы установки и закономерностей процесса ультразвукового удаления загрязнений в отверстиях и каналах малого диаметра; разработке конструкторской документации на установку; изготовлению и отладке экспериментального образца.

В связи с тем, что опытная конструкция стенда для контроля

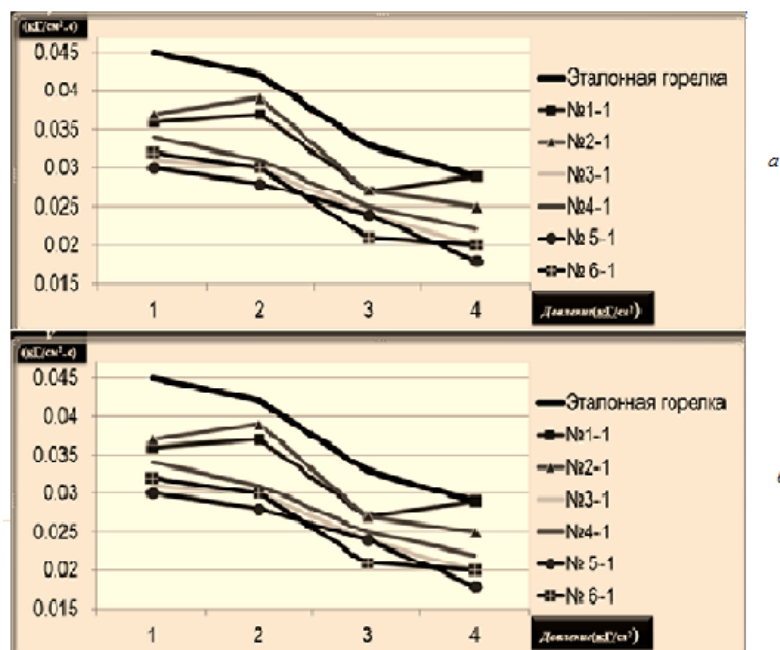


Рис. 3 Кинетика роста давления воздуха в баллоне при накачке: через эталонную горелку и эксплуатировавшиеся горелки (а), через эталонную горелку и горелки после трех циклов ультразвуковой очистки (б)



Рис. 4 Фонтаны на торцевой поверхности горелки при специальной схеме ультразвукового воздействия.

пропускной способности горелок не позволяла осуществлять прямые измерения расхода воздуха через рабочие сопла, степень засорения и очистки горелочного устройства оценивали по суммарному времени набора давления в герметичном баллоне, что может косвенно свидетельствовать о расходе воздуха, и по увеличению времени набора каждой последующей ступени прироста давления.

В результате измерений на стенде установлено следующее: средняя скорость набора давления через эталонную горелку составляет $0,035 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{с}$; средняя скорость набора давления через загрязненную горелку составляет $0,027 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{с}$; средняя скорость набора давления через очищенную горелку составляет $0,034 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{с}$; после ультразвуковой очистки скорость набора давления по сравнению с эталонной восстановлена на 97%. Таким образом, в среднем скорость накачки через очищенные горелки всего на 3 % меньше, чем через эталонную. Горелки после эксплуатации обеспечивают существенно меньшую скорость накачки – на 23%. Таким образом, по критерию расхода прокачиваемого газа (воздуха) ультразвуковая очистка по предложенной схеме может обеспечить практически полное восстановление пропускной способности горелочных устройств.

Таким образом, экспериментальные исследования показали принципиальную возможность восстановления первичных параметров горелочного устройства после ультразвуковой очистки по специальной схеме. При этом, как показывают эксперименты, эффективно отделяемые от стенок каналов ультразвуковым воздействием загрязнения остаются внутри каналов горелочного устройства и удаляются только при дополнительном механическом воздействии на него (встряхивание после переворачивания). Поэтому очистка должна происходить с циркуляцией моющей среды для непрерывного удаления отделяющихся под ультразвуковым воздействием загрязнений.

На основе результатов проведенных экспериментальных исследований производственных испытаний разработан и изготовлен в ООО «Ультразвук-ТЕО» опытный образец специальной ультразвуковой установки, обеспечивающей комбинированное общее и контактное

(местное) ультразвуковое воздействие на очищаемый объект.

Специальная конструкция излучателя обеспечивала интенсивность ультразвука в пределах $0,8-2 \text{ Вт/см}^2$. При этом на поверхности моющей жидкости возникают мощные акустические волны (рис. 5),



Рис. 5 Ультразвуковые волны на поверхности моющей жидкости при работающем излучателе

обеспечивающие эффективное удаление и вынос загрязнений из зоны обработки.

Проведены пробные испытания очищенных горелочных устройств в составе ГПА, подтвержденные актами Петровского ЛПУ МГ от 23 марта и 16 мая 2012 г. Установлено, что частота вращения турбины до демонтажа после 3731 часа эксплуатации составила (до очистки) 4180 об/мин. Частота вращения турбины после трех циклов общей ультразвуковой очистки – 4900 об/мин. После очистки по специальной схеме – 5050 об/мин. Номинальная частота вращения ротора турбины составляет 5000-5200 об/мин. Таким образом, использование разработанной технологии очистки каналов горелочных устройств позволяет полностью восстановить исходные механические характеристики газоперекачивающего агрегата.

Список литературы

1. Варламов Г.Б. Улучшение характеристик камеры сгорания ГТД за счет использования трубчатой технологии сжигания газа / Г.Б. Варламов // Газотурбинные технологии. – 2012. – № 3. – 48 с.
2. Илюшин А.Ф. О необходимости подготовки попутного нефтяного газа для конверсионных авиационных двигателей / А.Ф. Илюшин // Газотурбинные технологии. – 2012. – № 3. – 48 с.
3. Очистка поверхности изделий перед напылением газовыми разрядами / В.М. Таран, Б.С. Митин, Г.В. Бобров и др.// Теория и практика газотермического нанесения покрытий: тез. докл.– Димитров, 1983. – С.52-56.
4. Бржозовский Б.М. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. – Саратов: СГТУ, 2009. –348 с.

УДК 621.9.047/048

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДОВОДКИ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Д.С. Емжина

*СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия
Тел. (8964) 8456284; E-mail emzhina@list.ru*

Обоснован метод электроискрового легирования, описаны его достоинства и технология формирования восстановления рабочей

поверхности инструмента для шлифования труднообрабатываемых материалов и доводки отверстий в деталях приборо- и агрегатостроения.

Ключевые слова: электроискровое легирование, износ инструмента, шероховатость поверхности, микронеровности, ультразвук, однократная доводка.

VERIFICATION OF TECHNOLOGY FOR TOOL'S WORKING SURFACE, IT'S FORMATION AND RECOVERY USING IN ULTRASONIC SMOOTH SMALL-DIAMETER HOLE FINISHING USING ELECTRO-SPARK IMPLANTATION.

D.S. Emzhina

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

Electro-spark implantation, it's advantages and creation technology of working surface using for grinding of hard-processing materials and hole's finishing in apparatus- and device-producing.

Keywords: electro-spark implantation, instrument's tear, surface roughness, micro-roughness, singlepass finishing.

Эксплуатация инструмента и специальных деталей в различных отраслях машиностроения показывает, что ресурс их работы ограничен. Это обусловлено различными внешними факторами (агрессивная среда, температурно-силовое воздействие, абразивное изнашивание и др.). Для повышения работоспособности таких деталей и инструмента используют различные методы, в частности, наносят на ответственные участки покрытия.

Анализ последних лет показывает, что применение различных материалов и способов нанесения покрытий для повышения износа и коррозионной стойкости инструмента и деталей позволяет существенно увеличить срок их службы, а также значительно уменьшить затраты на их изготовление.

В настоящее время для упрочнения поверхности металлов и сплавов или придания ей определенных свойств разработано достаточное количество различных методов. Однако применение ряда из них в определенных ситуациях связано с некоторыми трудностями.

Во многих отраслях промышленности для повышения ресурса и надежности различных деталей и инструмента используются электроискровые упрочняющие технологии, что в машиностроении является эффективным методом поверхностного упрочнения деталей машин, изготовленных из обычных конструкционных материалов. Этот метод позволяет получать покрытия, прочно сцепленные с материалом основы и обладающие высокими эксплуатационными характеристиками.

Он основан на использовании электрических разрядов для управляемого разрушения материала заготовки с получением необходимых форм и размеров или для обработки рабочей поверхности детали (инструмента) и создания поверхностного слоя с требуемыми эксплуатационными свойствами.

Схема процесса представлена на рис. 1.

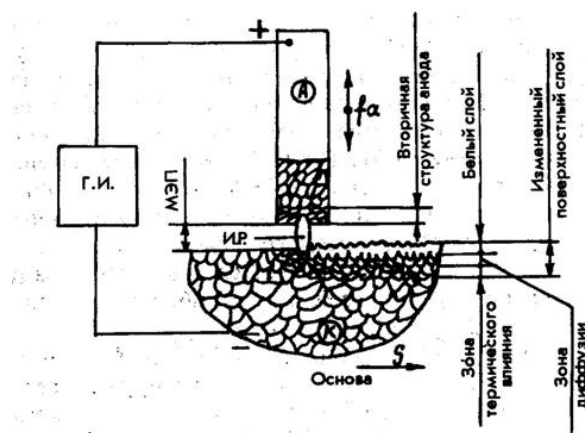


Рис. 1. Общая схема процесса электроискрового легирования [1]:

ГИ – генератор импульсов; МЭП – межэлектродный промежуток; ИР – искровой разряд; А– анод (компактный электрод); К – катод (деталь, инструмент); f_v – частота вибраций электрода

Наряду с возможностью формирования покрытий с характеристиками широкого диапазона значений, метод электроискрового легирования (ЭИЛ) обладает также рядом достоинств, определяющих его успешное использование для решения производственных проблем:

- возможность локального формирования покрытий в строго указанных местах радиусом от долей миллиметра и более, не защищая при этом остальную поверхность;
- высокая адгезия электроискрового покрытия с основным материалом;
- отсутствие нагрева и деформаций изделия в процессе обработки;
- возможность использования в качестве электродов большинства токопроводящих материалов, как из чистых металлов, так и их сплавов, композиций;
- сравнительная простота технологии, не требуется специальной предварительной обработки поверхности;
- высокая надежность оборудования и простота его обслуживания, оно малогабаритное и ремонтпригодное;
- низкая энергоемкость ручных и механизированных процессов ЭИЛ (0,3-2,0 кВт);
- высокий коэффициент переноса электродного материала (60-80%).

Широкие технологические возможности и достоинства ЭИЛ являются основой его эффективного успешного применения в различных

отраслях при упрочнении различных объектов из металлических материалов или восстановлении размеров, утраченных в процессе эксплуатации. Это в полной мере относится к машиностроительным предприятиям. Здесь электроискровые технологии применяются для увеличения износостойкости режущих инструментов заготовительного и основного производства [2,3].

При назначении технологии нанесения упрочняющих электроискровых покрытий и последующей обработки необходимо учитывать условия работы объектов упрочнения (инструментов, деталей), т.е. факторы, инициирующие изнашивание их рабочих поверхностей.

Область применения технологии:

- машиностроение – восстановление и упрочнение деталей машин;
- инструментальные участки – упрочнение режущих, деформирующих инструментов;
- энергетика – формирование эрозионно-стойких покрытий;
- металлургия – нанесение жаропрочных и жаростойких покрытий.

Одной из областей применения указанной технологии может являться формирование рабочей поверхности инструмента для шлифования труднообрабатываемых материалов и доводки отверстий.

Одним из основных показателей конкурентоспособности перспективных изделий различного назначения является надежность их функционирования в течение заданного срока эксплуатации. Применительно к машино- и приборостроению – это означает сохранение точности сопряжений двигающихся звеньев и их целостности при воздействии внешних нагрузок. Точность сопряжения определяется длительностью сохранения первоначальных размеров и формы контактирующих поверхностей, а также их шероховатости, т.е., в конечном итоге – износостойкостью. Последняя обеспечивается финишными процессами обработки: хонингованием, доводкой, дорнованием.

Доводкой-притиркой называется процесс финишной обработки, при котором съем металла с обрабатываемой поверхности осуществляется в основном абразивными (или алмазными) зернами, временно закрепленными или находящимися в свободном состоянии в зоне резания. Инструментом при доводке является притир.

Абразивная доводочно-притирочная обработка является основным, наиболее часто применяющимся видом отделочной обработки свободным абразивом, как плоских поверхностей, так и цилиндрических наружных и внутренних. Физическая сущность обработки поверхностей свободным абразивом принципиально отличается от физической сущности отделочных процессов, основанных на применении связанного абразива (тонкое шлифование, суперфиниширование и т.п.).

Доводку цилиндрических отверстий притирами с нанесением на них абразивной суспензии применяют для получения высокой геометрической точности отверстий, как в поперечном, так и в продольном сечениях.

Точность доведенного отверстия в поперечном сечении составляет 0,001 мм, в продольном сечении 0,002 мм, а шероховатость $0,02 \div 0,04$ мкм.

Притиры, как правило, изготавливают из чугуна; по конструкции они могут быть нерегулируемыми (неразжимными) и регулируемыми (разжимными). Нерегулируемые притиры применяют лишь для отверстий малых диаметров (до 5 мм). Регулируемые притиры имеют разрезную рубашку с внутренним конусом и разжимное устройство, которое при перемещении конуса увеличивает диаметр притира. Начальный диаметр притира обычно на $0,005 \div 0,03$ мм меньше диаметра обрабатываемого отверстия. Длину рабочей поверхности притира для сквозных отверстий назначают в пределах $1,2 \div 1,5$ глубины обрабатываемого отверстия, а для глухих — меньше глубины отверстия.

Станки для доводки цилиндрических отверстий (рис. 2) могут быть вертикальными и горизонтальными, одношпиндельными и многошпиндельными, однопозиционными и многопозиционными. По назначению они бывают для притирки сквозных и глухих отверстий [4].



Рис. 2. Станок мод. 3820Д

Типовыми представителями изделий, в технологический маршрут изготовления которых включаются операции доводки и хонингования отверстий, являются детали механических приборов, топливной и

пневмоаппаратуры, а также агрегатов управления. Характерным для указанных изделий является малый диаметр (менее 5 мм) и относительно большая длина отверстий, имеющих высокие требования к точности (Н6-Н5) и шероховатости ($Ra = 0,08-0,16$ мкм). Большая часть указанных изделий изготавливается из высоколегированных сталей и сплавов, обладающих высокими прочностными свойствами и адгезионной способностью к абразивным материалам. Наиболее широко изделия с указанными параметрами применяются в авиационной и ракетной технике [5,6]. Ранее ультразвуковое алмазное развертывание и доводка отверстий малого диаметра были ориентированы на применение в конструкции инструмента деформируемого алмазосодержащего проката, разработанного и производившегося в ИСМ АН УССР. В настоящее время технология производства проката может считаться практически утраченной, а предприятие-разработчик находится на Украине, что значительно затрудняет его использование. Применение алмазосодержащих гальванических покрытий нецелесообразно по причине их малой стойкости в условиях ультразвуковых колебаний. Кроме того, малые размеры практически исключают использование марок недеформируемого твердого алмазосодержащего проката, производящегося в России, и применение конструкций разжимного инструмента, что необходимо для поддержания постоянного давления на обрабатываемую поверхность и обеспечения стабильного съема материала.

Известен способ доводки точных отверстий инструментом (притиром), совершающим вращательное и возвратно-поступательное движения с одновременным наложением на них (движения) вибрационных движений от механического источника колебаний.

При осуществлении доводки точных отверстий по предложенному способу повышаются интенсивность процесса доводки и чистота обработанной поверхности, а также уменьшается износ притира (инструмента) при доводке за счет применения вибрационных движений с частотой колебаний от 100 до 10.000 Гц и амплитудой от 1 до 7 мкм.

При использовании предложенного способа в процессе доводки увеличивается производительность процесса (съем металла в единицу времени) примерно в 2 раза по отношению к доводке без вибрации.

Однако при осуществлении этого способа интенсивность процесса доводки недостаточна и не всегда можно получить требуемую чистоту обработанной поверхности [7].

В настоящее время энергия ультразвуковых колебаний (УЗК) широко используется для интенсификации абразивной обработки.

Наиболее эффективными процессами могут считаться ультразвуковая алмазная доводка и ее разновидность – алмазное развертывание, формирующие практически любой требуемый микрорельеф с одновременным упрочнением поверхности.

Введение в зону обработки ультразвуковых колебаний позволяет повысить производительность процесса доводки по съему припуска в 4,5 раза, по времени достижения требуемой точности – в 3,4 раза и значительно улучшить качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей [8].

Однако применение ультразвуковых колебаний при обработке высокопрочных материалов приводит к повышенному износу инструмента из-за выкрашивания зерен.

Ранее нами были проведены исследования процесса финишной обработки наружных поверхностей дисковым металлическим инструментом, рабочая поверхность которого в процессе обработки возобновлялась электроразрядным нанесением частиц металлического порошка, подаваемого в зазор между электродом и инструментом [9]. Однако этот метод вследствие значительной величины образующихся микронеровностей на инструменте целесообразно применять только на операциях чернового и получистового шлифования.

Указанный метод может быть с учетом доработки применен и для изготовления инструмента для ультразвуковой доводки отверстий.

В этом направлении необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей: учеб. пособие / Н. И. Лазаренко. – М.: Машиностроение, 1976. – 44 с.
2. Электроискровое легирование металлических поверхностей: учеб. пособие / Г. В. Самсонов, А. Д. Верхотуров, Г. А. Бовкун, В. С. Сычев. – Киев: Наукова думка, 1976. – 220 с.
3. Электроискровое легирование металлических поверхностей: учеб. пособие / Ф. Х. Бурумкулов, П. В. Сенин, П. П. Лезин и др. – Саранск: ИМЭ МГУ, 2004. – 485 с.
4. Станки для доводки отверстий [Электронный ресурс]. URL: <http://www.4ne.ru/stati/derevoobrabatyvayushhie-stanki/dovodochnye-stanki/stanki-dlya-dovodki-otverstij.html> (Дата обращения 10.06.2014).
5. Материаловедение и технология металлов: учебник для студентов машиностроит. спец. вузов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин и др.; под ред. Г. П. Фетисова. – 6-е изд., доп. – М.: Высшая школа, 2008. – 877 с.
6. Высокопрочные коррозионно-стойкие стали в современной авиации / под ред. А. Г. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 2006. – 656 с.
7. А.с. №138155 СССР. Способ доводки точных отверстий / К. И. Тритко, Н. И. Бахтияров, В. И. Кузнецов // Б.И. – 1961. – №9.

8. Бржозовский Б. М. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие / Б. М. Бржозовский, Н. В. Бекренев. – Саратов: СГТУ, 2009. – 348 с.

9. Научно-техническая технология обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов / Н. В. Бекренев, В. М. Фирсов, А. П. Петровский и др. // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – №7. – С. 26-28.

УДК 621.9.079:621.892

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС, НАРЕЗАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

С.И. Агапов¹, Н.А. Федянова²

¹*Волгоградский государственный технический университет*

²*Волгоградский институт бизнеса,*

г. Волгоград, Россия Тел.844-237-27-79; E-mail: stanki@vstu.ru

Обоснована необходимость контроля кинематической погрешности цепи обката при зубофрезеровании мелко модульных зубчатых колес в процессе их изготовления.

Ключевые слова: кинематическая погрешность цепи обката при зубофрезеровании, нарезание мелко модульных зубчатых колес.

INCREASING OF A SMALL-MODULED GEARS CUTTED USING ULTRASONIC VIBRATIONS ACCURACY

S.I. Agapov¹, N.A. Fedyanova²

¹*Volgograd State Technical University*

²*Volgograd University of Business,
Volgograd, Russia*

Necessity of controlling kinematic inaccuracy of the system of tool and workpiece during the process of small-moduled gears milling is substantiated.

Keywords: kinematic inaccuracy of the system of tool and workpiece during gear milling, cutting of a small-moduled gears.

В настоящее время промышленность все больше нуждается в высокоточном оборудовании, обеспечивающем повышенное качество изготовления зубчатых колес. Поэтому одной из важнейших проблем является контроль использования в зуборезных станках кинематических цепей с высокой точностью передачи движения.

При изготовлении зубчатых колес основным показателем качества механической обработки, обеспечение которого вызывает наибольшие трудности и затраты, является точность. При нормировании точности зубчатых колес в международном стандарте ИСО 1328 и государственном стандарте 9178-81 устанавливаются требования к значительному числу нормируемых параметров. Для приемочного контроля в этих документах нормируются требования к кинематической погрешности, которые наиболее полно характеризуют эксплуатационные характеристики зубчатого колеса. Кроме этого, в стандартах приводятся требования к погрешности отдельных элементов зубчатых колес. Наиболее целесообразна область использования показателей погрешности отдельных параметров зубчатых колес – это анализ точности технологического процесса, поскольку погрешность большинства элементов тесно связана с погрешностью технологического оборудования и процесса зубонарезания [1, 3].

Проверка точности зубчатого колеса по результатам измерения в процессе производства является наиболее современной, так как позволяет регулировать параметры колеса и предупредить появление брака вместо его регистрации. Основная цель измерения в процессе изготовления заключается в определении причин появления погрешностей и прогнозирования показателей зубчатых колес.

Недостаточный выпуск кинематомеров, предназначенных для измерения кинематической погрешности, затрудняет анализ точности зубчатых колес, а их отсутствие в составе зуборезного оборудования не позволяет контролировать процесс зубонарезания. По полученным диаграммам кинематической погрешности можно определить практически все нормируемые показатели зубчатых колес, выявить закономерности изменения и проявления этих погрешностей, провести анализ их взаимосвязи, установить пути компенсации этих погрешностей. Полученные данные позволяют дать объективную оценку точности зубчатых колес и управлять процессом производства зубчатых колес требуемого качества.

Для измерения кинематической погрешности зубчатого колеса в процессе изготовления была собрана установка, состоящая из ультразвукового приспособления, блока поднастройки ультразвукового генератора (УЗГ) по частоте, УЗГ и кинематомера (рис.1), которая позволяет проводить измерения кинематической погрешности в зависимости от измерения технологических режимов резания и геометрических параметров зубчатого колеса в процессе обработки. Перед началом измерения кинематической погрешности и после его окончания, а также после сбоя в работе, кинематомер тарировали повторно с записью на самописец.

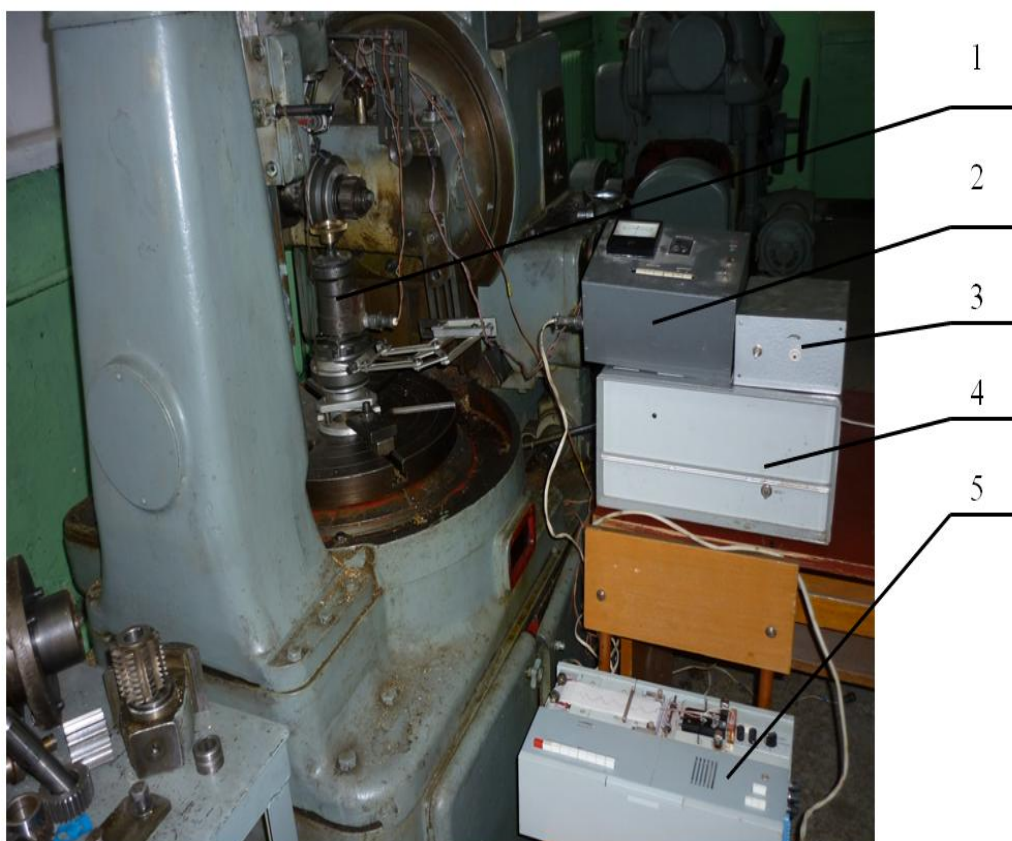


Рис. 1. Установка для измерения кинематической погрешности зубчатого колеса в процессе его изготовления:

- 1- ультразвуковое приспособление; 2-электронный блок кинематомера;
3-блок поднастройки УЗГ по частоте; 4- УЗГ; 5-самописец

Исследования влияния скорости резания на кинематическую погрешность мелкозубчатых колес осуществлялись Г.Г. Иноземцевым и Ю.П. Прудниковым [2], Н.А. Харламовым [4], однако измерения проводились на колесах после их изготовления, что явно недостаточно в современных условиях производства, поэтому возникла необходимость в проведении исследований по этому вопросу, для чего была спроектирована и изготовлена установка для измерения кинематической погрешности в процессе зубофрезерования. Установка изготовлена на базе кинематомера модели 1.3.90.000 с закрепленным на нем ультразвуковым приспособлением.

Влияние скорости резания на кинематическую погрешность зубчатого колеса представлено на рис. 2. Как видно из приведенных данных, увеличение скорости резания ведет к росту кинематической погрешности зубчатого колеса, как при традиционной обработке, так и при введении УЗК в зону резания.

При увеличении скорости резания с 0,5 до 0,83 м/с, кинематическая погрешность увеличивалась при обычном зубонарезании колес на 38%, а при ультразвуковом зубонарезании – на 36%.

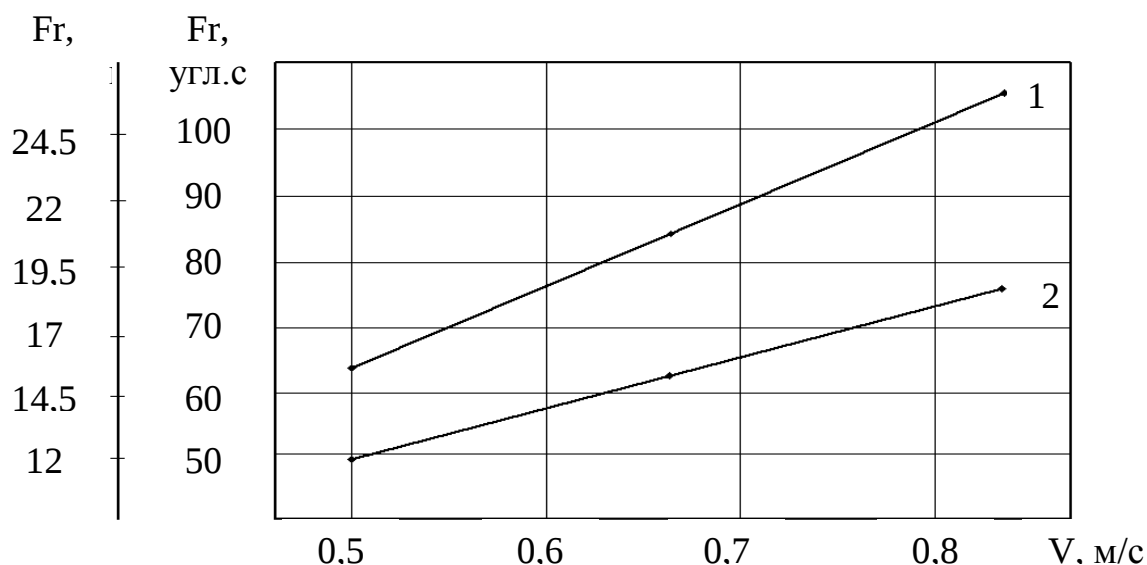


Рис. 2. Зависимость изменения кинематической погрешности зубчатого колеса от скорости резания при зубофрезеровании: заготовка—сталь ОХН1М, $z = 40$, $m = 0,8$ мм, инструмент-Р6М5, $S = 0,5$ мм/об

Применение УЗК при нарезании мелко модульных зубчатых колес в диапазоне $0,5 \dots 0,83$ м/с уменьшает кинематическую погрешность зубчатого колеса при традиционной обработке в $1,34 \dots 1,56$ раза.

Данные результаты можно объяснить следующим образом:

1. С увеличением скорости резания возрастают инерционные нагрузки и вибрации технологической системы.
2. С увеличением скорости резания возрастает неравномерность распределения удельных контактных напряжений, что приводит к увеличению рассогласования действительного и номинального углов поворота, т.е. к изменению мгновенного передаточного отношения.

Влияние изменения подачи на кинематическую погрешность зубчатых колес показана на рис.3, анализ полученных результатов показывает, что кинематическая погрешность увеличивается при традиционной обработке в $1,41$ раза, а при введении УЗК в зону резания – в $1,29$ раза, т.е. процесс более стабилен.

Применение УЗК при зубофрезеровании мелко модульных колес позволило уменьшить кинематическую погрешность зубчатого колеса при диапазоне подач $0,35 \dots 0,75$ мм/об в $1,15 \dots 1,25$ раза.

Это объясняется тем, что при относительно постоянной жесткости технологической системы с увеличением подачи силы резания и амплитуда их колебания увеличиваются при традиционной обработке, что приводит к повышению упругих отжатий указанной системы, а введение УЗК в зону резания уменьшает силы резания в $2 \dots 2,4$ раза, что и повышает стабильность процесса резания.

Зная кинематическую погрешность зубчатого колеса и соотношение низко- и высокочастотной составляющих, можно найти отклонение шага

зацепления, профиля, накопленной погрешности шага. Этих параметров достаточно для выявления точности других элементов зубчатого колеса, так как их погрешности вызываются теми же причинами, либо суммой причин. Определение значений параметров норм точности позволит разработать технологический процесс, который обеспечит эффективное исправление этих погрешностей.

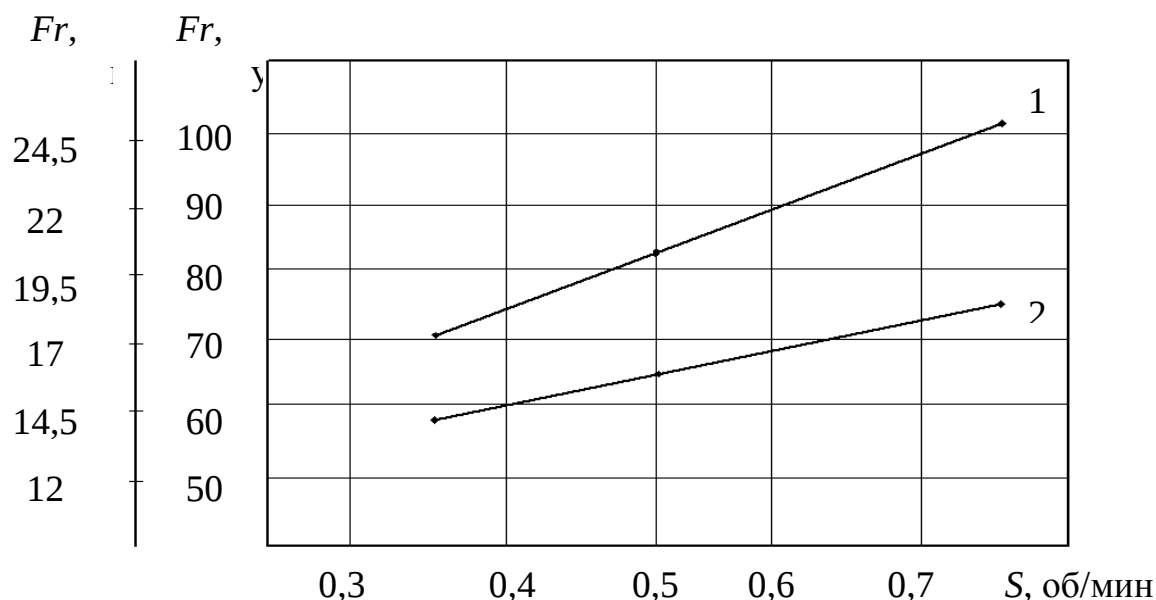


Рис.3. Зависимость изменения кинематической погрешности зубчатого колеса от подачи при зубофрезеровании:
заготовка – сталь ОХН1М, $z = 40$, $m = 0,8$ мм, инструмент – Р6М5, $V = 0,66$ м/с
1 – обработка без УЗК; 2 – обработка с УЗК

Для определения кинематической погрешности зубчатого колеса, с учетом технологических факторов составим таблицу 1.

Таблица 1. Значение кинематической погрешности зубчатого колеса (F_r) из стали 40Х в процессе традиционного и УЗК фрезерования

m	z	S	V	F_r			
				без УЗК		с УЗК	
				опыт.	расч.	опыт.	расч.
мм	–	мм/об	м/с	мкм			
0,8	40	0,5	0,48	65	63,0	49	48,6
			0,66	85	85,5	65	65,0
			0,84	107	108,0	77	81,0
		0,35	0,66	68	70,5	58	58,0
		0,75		103	106,5	75	74,5

Примечания: 1. Амплитуда ультразвуковых колебаний 4 мкм.

2. Значения накопленной погрешности шага (F_r) получены как среднее арифметическое из результатов 3...5 измерений.

3. Среднее отклонение опытных данных от расчетных (по регрессионной зависимости) не превышает 6%, а максимальное отклонение – 12 %.

После обработки данных при $m = 0,8$ мм, $z = 40$, $V = 0,48 \dots 0,84$ м/с и $S = 0,35 \dots 0,75$ мм/об по программе получим зависимости:

$$F_r = 120 \cdot S^{0,33} \cdot V^{0,92} - \text{зубофрезерование без УЗК};$$

$$F_r = 186 \cdot S^{0,54} \cdot V^{0,97} - \text{зубофрезерование с УЗК}.$$

Достоверность данной модели составляет 94 и 97 % при относительной погрешности 2 % в обоих случаях.

Анализ полученной зависимости показывает, что на кинематическую погрешность зубчатого колеса большее влияние оказывает скорость резания и меньшее – подача.

Список литературы

1. Агапов С.И. Determining the optimal amplitudes and directions of ultrasound vibrations in cutting small-module gears / С.И. Агапов, И.Г. Ткаченко // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, № 2. – С. 141-143.
2. Иноземцев Г.Г. Рациональная технология зубонарезания червячными фрезами мелко модульных цилиндрических колёс из труднообрабатываемых металлов / Г.Г. Иноземцев, Ю.П. Прудников // Проблемы совершенствования малогабаритных зубофрезерных станков. – Вильнюс, 1975. – С. 142-152.
3. Макаров А.Л. Измерение зубчатых колёс : допуски, методы и средства контроля / А.Л. Макаров. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1977. – 280 с.
4. Харламов Н.А. Исследование некоторых параметров точности мелко модульных колёс при зубофрезеровании червячными фрезами с различными схемами резания / Н.А. Харламов // Технологические методы обеспечения качества зубчатых передач: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Свердловск, 1981. – С. 98-100.

УДК 621.78

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ИК-МОДИФИКАЦИИ НА СТРУКТУРУ И МОРФОЛОГИЮ ПЛАЗМОНАПЫЛЕННЫХ ГИДРОКСИАПАТИТОВЫХ ПОКРЫТИЙ

В.А. Папшев, Н.В. Бекренев, В.Н. Лясников, И.В. Злобина

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Тел. (8452) 998623; E-mail: oversway@mail.ru

Приводятся экспериментальные результаты лазерного импульсного ИК-модифицирования плазмонапыленных гидроксипатитовых покрытий. Отражены характерные изменения морфологии, обусловленные
ИНЖИНИРИНГ ТЕХНО 2014

формированием на поверхности структурных элементов нового типа. Основные данные получены с помощью растровой электронной микроскопии.

Ключевые слова: лазерная модификация, ИК-излучение, плазмонапыленное покрытие, гидроксиапатит.

STUDY OF MODES OF LASER INFRARED MODIFICATIONS ON THE STRUCTURE AND MORPHOLOGY OF PLASMA SPRAYING HYDROXYAPATITE COATING

V.A. Papschev, N.V. Bekrenev, V.N. Lyasnikov, I.V. Zlobina
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

This research proves experimental results of pulsed laser infrared modification on plasma spraying hydroxyapatite coatings. Reflected the characteristic morphological changes caused by formation on the surface of the structural elements of a new type. Basic data obtained by scanning electron microscopy.

Keywords: laser treatment, hydroxyapatite, plasma spraying coating.

Введение

Одним из наиболее распространенных технологий получения кальцийфосфатных гидроксиапатитовых (ГА) покрытий на внутрикостных имплантатах, обеспечивающих формирование необходимого комплекса физико-механических параметров, является электроплазменное напыление [1]. Сочетание плазменного напыления в определенной последовательности с дополнительным энергетическим воздействием позволяет создавать материалы и покрытия с повышенными значениями либо широким комплексом новых свойств [2]. В этом аспекте представляет интерес комплексный метод электроплазменного формирования ГА покрытия с его последующим лазерным ИК-модифицированием. Это вызвано тем, что плазменное напыление, как эффективный способ создания ГА биопокрытий, в то же время обуславливает появление различных нежелательных последствий, таких как дегидратация, нарушение стехиометричности, снижение кристалличности. Их компенсация возможна за счет применения дополнительной лазерной ИК-обработки покрытия, размещенного в водной среде [3].

Одними из наиболее важных качеств биосовместимости покрытия из гидроксиапатитовой (ГА) керамики являются структурные и морфологические параметры поверхности. В связи с этим представляется важным исследовать влияние режимов лазерной модификации покрытий на критерии качества.

Методика проведения исследований

В проводимом эксперименте образец с напыленным покрытием размещается в кювете с водой, расположенной на двухкоординатном столе, таким образом, чтобы толщина слоя воды составляла 500 ± 100 мкм (рис. 1). Модификация покрытий проводится на Nd:YAG-лазерном технологическом комплексе «lrs-50» (рис. 1). Контроль плотности мощности лазерного излучения осуществляется с помощью специального измерителя мощности «Laserstar Orphi». Толщина выбирается исходя из соображения минимального поглощения водой лазерного излучения ИК-диапазона. В дальнейших исследованиях указанные потери могут быть компенсированы за счет соответствующего повышения мощности излучения. В лазерных технологиях обработки материалов наиболее часто используется энергетический параметр *плотность мощности* падающего излучения, измеряемый в Вт/м².

На основе проведенного теоретического анализа установлена возможность восстановления стехиометрического состава ГА при лазерной обработке покрытия. Необходимыми условиями для этого являются использование ИК-излучения в пределах $q = 0,5 \dots 2 \cdot 10^8$ Вт/м² и наличие водной среды, в которой осуществляется обработка.

В процессе проведения эксперимента устанавливаются диапазон значений напряжения накачки U и диапазон значений длительности



Рис. 1. Лазерный комплекс «lrs-50»

импульса τ , при которых происходят визуальные изменения на покрытии. Так, установлено, что минимальные изменения появляются при обработке на режимах $U = 250$ В и $\tau = 2$ мс. Использование режимов $U = 290$ В и $\tau = 6$ мс приводит к локальному разрушению покрытия. При помощи измерителя мощности установлен диапазон соответствующих значений плотности мощности $q = 0,51 \dots 1,91 \cdot 10^8$ Вт/м². Фактически данный диапазон немного ниже величины q , используемой в расчетах модели для оценки степени нагрева, но это показывает хорошую сходимость предварительных результатов и является допустимым для дальнейшего исследования.

Образцами для всех исследований служат пластины титана ВТ1-00 размерами $10 \times 10 \times 2$ мм, на которые электроплазменным методом наносятся опытные виды ГА покрытий с титановым промежуточным подслоем. При напылении используются многократно апробированные технологические режимы [4].

Исследование покрытий проводилось с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе «MIRA II LMU», позволяющей исследовать морфологию напыленных покрытий, в том числе микро- и наноструктуру поверхности. Исследование химического состава при энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) осуществлялось как интегрально по поверхности, так и на отдельных морфологических структурах. Изучение элементов структуры на РЭМ-изображениях поверхности и сколов покрытий, а также анализ спектров ЭДС производится в интерфейсах программ к растровому микроскопу.

Для оценки *шероховатости* поверхности используются стандартные параметры R_a , R_z , R_{max} , S_m , измеренные с применением профилометра 107622 (версия 3.1) с компьютерной обработкой полученных данных.

Полученные результаты и их анализ

Лазерная модификация покрытия в зависимости от различных режимов приводит к образованию нескольких типов морфологических структур. Среди них можно выделить отслоения на поверхности частиц покрытия, имеющих различный характер в зависимости от плотности мощности q падающего импульсного излучения и длительности импульса τ . Для анализа морфологии используется классификация электроплазменных ГА покрытий [4].

Установлено, что после обработки при значениях $q < 1 \cdot 10^8$ Вт/м² и $\tau = 2$ мс на поверхности многих частиц появляются трещины с образованием отслоений, толщина которых составляет порядка 50-100 нм (рис. 2, а, б). Предположительно формирование данных отслоений связано с субзеренной структурой напыленной частицы.

Лазерная обработка при $U = 250$ В и $\tau = 6$ мс приводит к тому, что отслоения обретают чешуйчатую форму с размерами более 10 мкм (рис. 2, в-е). Увеличение энергии импульса при $U = 290$ В и $\tau = 6$ мс, соответствующих значению $q = 1,81 \cdot 10^8$ Вт/м², приводит к образованию более крупных отслоений, отличающихся по форме (рис. 2, д, е). Сила сцепления таких частиц основывается в основном на Ван-дер-Ваальсовом притяжении. У большинства подобных чешуйчатых структур края заворачиваются к центру, что позволяет выбрать участок, наиболее удаленный от поверхности. Методом ЭДС (рис. 2, е) установлено, что в состав чешуйчатых структур входят кислород и кальций (табл. 1). Имеющийся фосфор, вероятнее всего, фиксируется ввиду особенности метода ЭДС, когда происходит фиксирование данных с близкорасположенной от точки измерения поверхности.

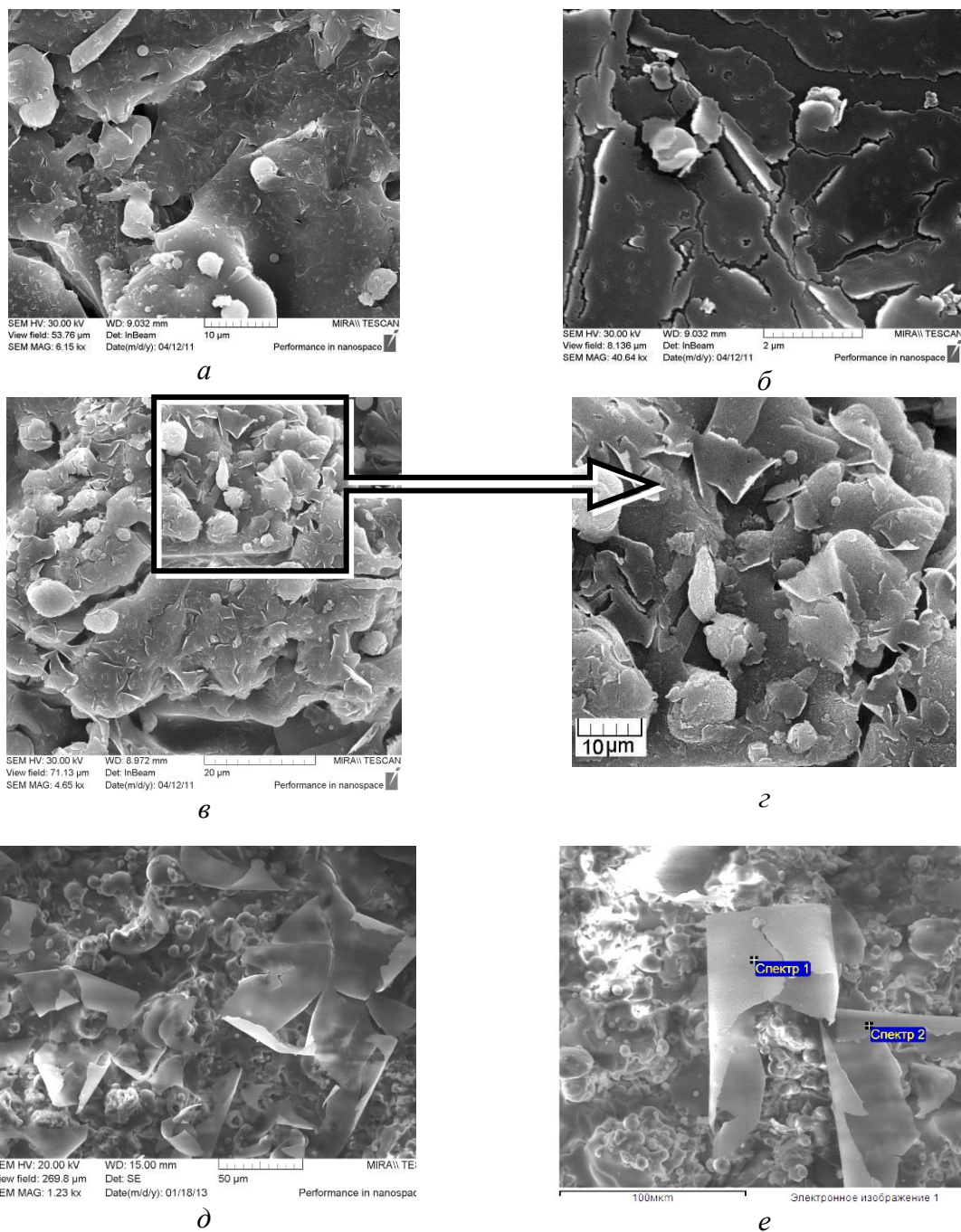


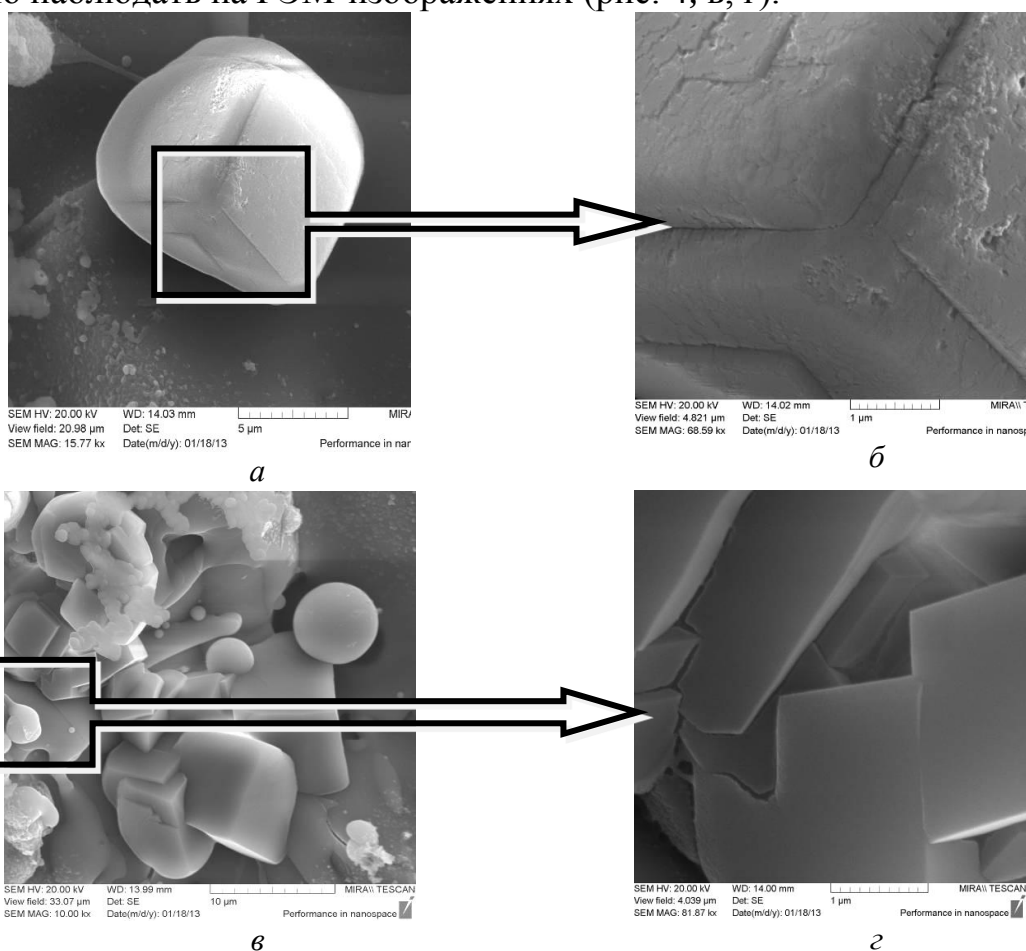
Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности ГА покрытия, обработанного лазерным излучением при различных режимах:
а, б – $q=0,53 \cdot 10^8$ Вт/м² при $\tau=2$ мс,
в, г – $q=0,91 \cdot 10^8$ Вт/м² при $\tau=6$ мс;
д, е – $q=1,51 \cdot 10^8$ Вт/м² при $\tau=2$ мс

Таблица 1. Химический состав чешуйчатых структур

Область	O ₂ , %	P, %	Ca, %
Спектр 1	58,99	8,70	32,31
Спектр 2	54,60	7,67	37,73

Влияние данных структур на биологическую активность требует проведения дополнительного исследования. Но предполагается, что, обладая микро-, наноразмерностью, эти структуры могут иметь высокую биологическую активность по отношению к формированию костных структур. В то же время некоторое содержание СаО придает дополнительную механическую прочность.

Следующей характерной особенностью лазерной модификации покрытия в воде является образование кристаллов призматической, либо многогранно кубической формы (рис. 3, в, д, з). Их разновидность связана не только с параметрами обработки, но и с начальным структурно-фазовым состоянием, которое ранее было рассмотрено в классификации. Данные структуры могут располагаться как локально на поверхности, так и в виде скоплений. Формирование граней кубических структур происходит из сферических частиц ГА, характерных для плазменного напыления, при минимальных параметрах обработки $q=0,53 \cdot 10^8$ Вт/м² и $\tau=2$ мс (рис. 3, а, б). Обработка при q свыше $0,91 \cdot 10^8$ Вт/м² приводит к увеличению концентрации кристаллов на поверхности покрытия. Это выражается как в образовании скоплений (рис. 3, в, г), так и формировании более сложных многогранных структур при повышенных значениях q (рис. 4, а, б). При этом они обладают достаточно гладкой поверхностью, которую визуально можно наблюдать на РЭМ-изображениях (рис. 4, в, г).



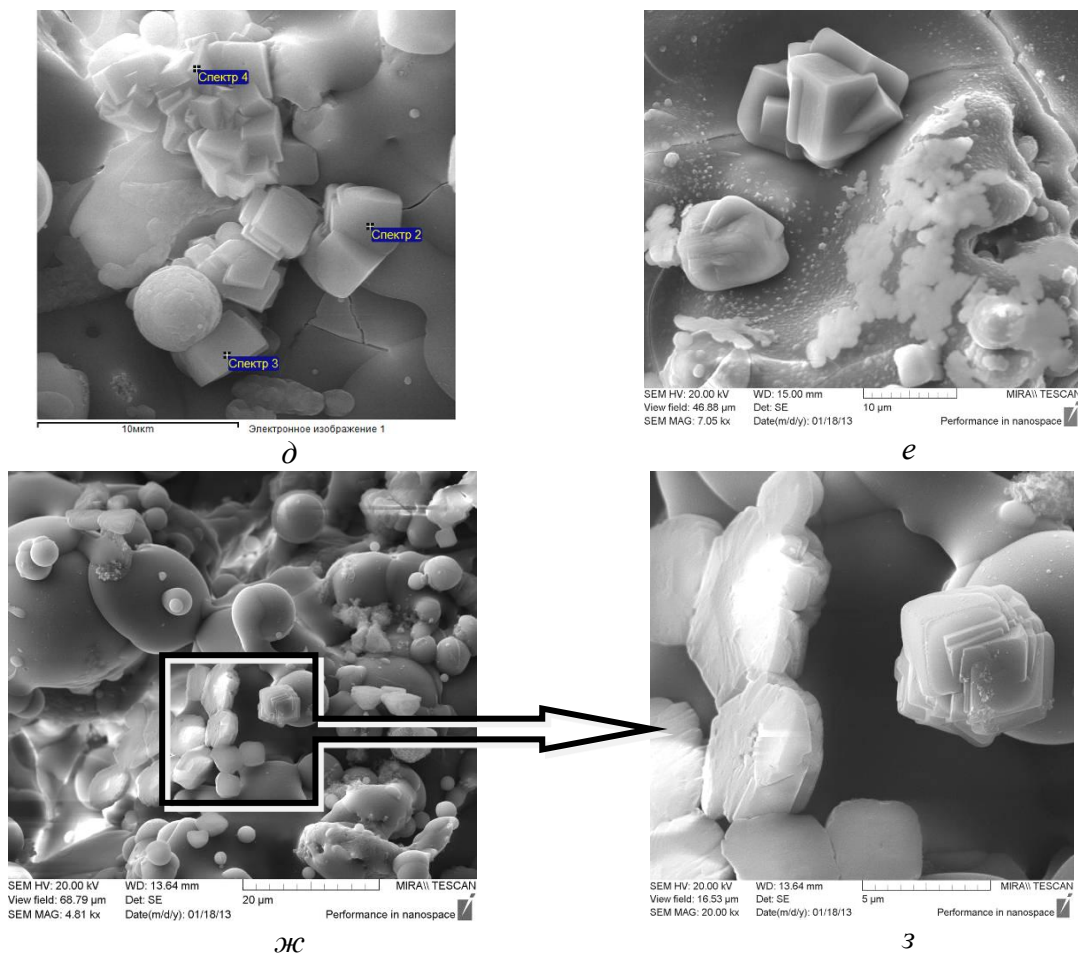


Рис. 3. РЭМ-изображения поверхности покрытия, обработанного лазерным излучением при различных режимах:
а, б, в, г – $q=0,53 \times 10^8$ Вт/м² $\tau=2$ мс,
д, е, ж, з – $q=0,91 \times 10^8$ Вт/м² $\tau=2$ мс,

На многочисленных изображениях наряду с ограниченными структурами присутствуют мелкие сферические частицы без явного морфологического изменения. Согласно классификации [4], данные частицы относятся к типу IV, при этом для их состава характерно преобладание фазы ГА (рис. 3, ж). Так же часто можно наблюдать кубические структуры, расположенные скоплениями на разных участках и относящиеся к скоплениям типа II-б (рис.3, д). Подтверждение этому находится после получения данных ЭДС-анализа, указывающих на состав фазы с преобладанием СаО (табл. 2). Таким образом, предполагается, что кубическим трансформациям подвергаются частицы покрытия с фазовым составом, отличным от ГА.

Таблица 2. Химический состав ограниченных структур

Область	О, %	Р, %	Са, %
Спектр интегральный	46,04	12,74	41,23
Спектр 2	40,49	8,01	51,50
Спектр 3	40,98	5,0	54,02
Спектр 4	68,30	0,76	30,95

Химический состав указанных кристаллов имеет сходство с чешуйчатыми структурами, содержащими кислород и кальций при незначительном количестве фосфора.

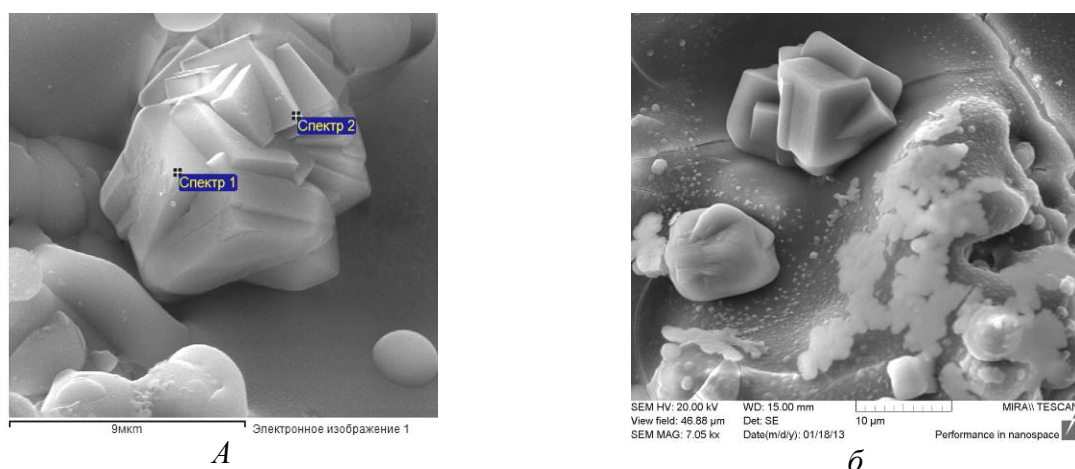


Рис. 4. РЭМ-изображение фрагментов покрытия после лазерной обработки при $q=1,51 \times 10^8$ Вт/м² $\tau=4$ мс с указанием участков (табл. 3) проведения ЭДС-анализа (увел. 7 тыс.крат).

Таблица 3. Химический состав призматических кристаллов

Область	O, %	P, %	Ca, %
Спектр 1	68,34	1,21	30,46
Спектр 2	57,43	0,8	51,50

Использование режимов модификации $U=290$ В и $\tau=6$ мс приводит к локальному разрушению покрытия, что отчетливо фиксируется на РЭМ-изображениях морфологии. На поверхности (рис. 5) видны зоны с углублениями, практически достигающими титанового подслоя. Такое разрушение происходит по центру пятна облучения, что характерно при гаусовском распределении мощности. При этом размер зоны разрушения не превышает 1 мм. С точки зрения практического применения покрытия, участки в виде кратеров могут способствовать улучшению процессов остеointеграции за счет более глубокого врастания и зацепления костной ткани. Для оценки влияния лазерной обработки на микрорельеф поверхности проводились исследования шероховатости покрытий. Полученные данные сравниваются со значениями аналогичных параметров для покрытия без лазерной обработки.

Для установления рациональных значений технологических режимов необходимо проведение исследований по их влиянию на шероховатость, кристалличность и прочность сцепления покрытия с основой.

Шероховатость электроплазменных ГА покрытий является одним из необходимых критериев обеспечения повышенных качеств биоактивности. По аналогии с исследованием морфологии определяются режимы, позволяющие формировать наиболее шероховатую поверхность покрытия. Для этого изучается влияние режимов лазерной обработки покрытий на

параметры шероховатости. Ввиду значительного перепада высоты микронеровностей при воздействии излучения выше $q > 1,5 \cdot 10^8$ Вт/м² на данном этапе используются покрытия толщиной около 150 мкм.

После обработки данных профилометрических измерений получены следующие значения параметров шероховатости в зависимости от исследуемого диапазона q при двух величинах коэффициента перекрытия пятен облучения $k=15\%$ и 75% (рис. 6).

Анализ полученных данных позволяет отметить характер изменения значений шероховатости по параметрам R_z , R_{max} , S_m при различных коэффициентах перекрытия пятен облучения. При исследовании покрытий, обработанных лазером с минимальным перекрытием $k=15\%$, установлен общий характер периодического изменения значений параметров R_{max} и R_a . С увеличением плотности мощности от 1,51 до 1,81 Вт/м² при обоих значениях коэффициента k происходит повышение величин по всем параметрам шероховатости до их максимального значения, кроме параметра R_a . Для данного параметра при $k=15\%$ наибольшее значение достигается при $q=0,91 \cdot 10^8$ Вт/м².

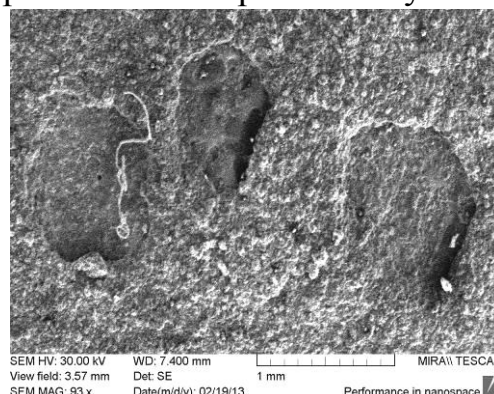
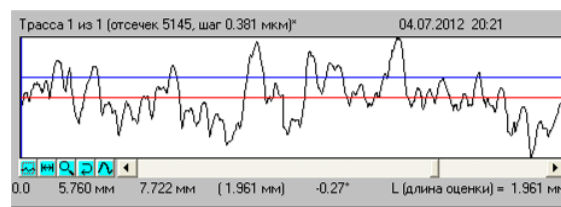
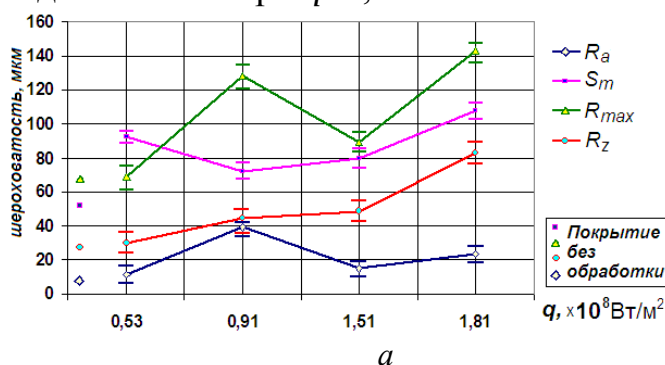
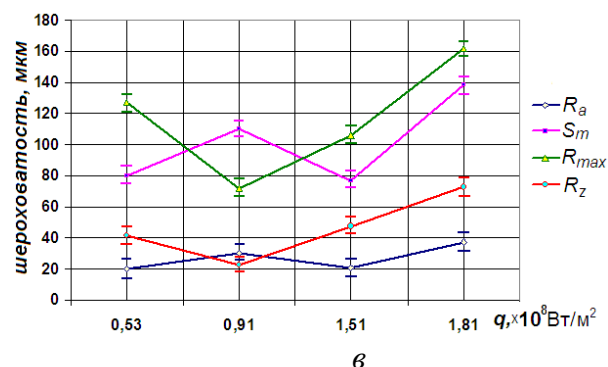


Рис. 5. РЭМ изображение морфологии покрытия, обработанного излучением $q=1,91 \cdot 10^8$ Вт/м² при $U=290$ В и $\tau=6$ мс (увел. 93 крат.)



$q = 1,81 \cdot 10^8$ Вт/м²
б



$q = 1,81 \cdot 10^8$ Вт/м²
г

Рис. 6. Графики влияния различных значений плотности мощности на параметры шероховатости ГА покрытия и соответствующие профилограммы при различном значении коэффициента перекрытия: а, б – $k=15\%$; в, г – $k=75\%$

Вместе с тем, на всем диапазоне q росту зависимости R_z свойственна относительная возрастающая монотонность (рис. 6, а), тогда как при $k=75\%$ (рис. 6, б) формируется линейная возрастающая зависимость лишь в диапазоне q от $0,9 \cdot 10^8$ Вт/м².

Изучение зависимостей позволяет утверждать, что коэффициент перекрытия пятен облучения не оказывает существенного влияния на параметр R_a .

Данная вариация характеров зависимостей связана с особенностями взаимодействия лазерного излучения с поверхностью:

- расплавление и выделение поверхностных микродефектов, например, границы зерен, субмикropоры, а также преобразование фазы АФК, как наиболее растворимой;
- увеличение перепада высот по параметру R_{max} за счет отражения светового потока от стенок в местах углубления;
- формирование на поверхности призматических кристаллов и чешуйчатых структур.

Анализ данных шероховатости позволяет установить зависимость увеличения морфологической гетерогенности в 5 раз по сравнению с немодифицированным покрытием от варьирования факторов. В зависимости от величины длительности импульса τ увеличение k может повышать или уменьшать морфологическую гетерогенность. Такое поведение зависимости вызвано образованием дополнительных морфологических структур на покрытии, а также локальных участков разрушения покрытия при максимальных режимах. С учетом данных фазового состава можно сделать вывод о целесообразности использования сочетания режимов, обеспечивающих $q = 0,91 \dots 1,51 \cdot 10^8$ Вт/м² при допустимом отклонении 5...10 % для получения морфологически развитых покрытий.

Заключение

Результаты исследования морфологии и структуры ГА покрытий показывают увеличение морфологической гетерогенности за счет формирования двух типов поверхностных структур: частиц чешуйчатого типа и призматических кристаллов. Повышение плотности мощности q вызывает увеличение содержания призматических кристаллов. Причина возникновения новых структур связана с фазовым составом напыленного покрытия, в частности, распределением фаз в отдельных морфологических структурах поверхности. Также стоит отметить, что использование дополнительной лазерной ИК-модификации получаемых покрытий в водной среде способно улучшить структурно-фазовое состояние и повысить значения физико-механических характеристик.

Список литературы

1. Бутовский К.Г. Напыленные покрытия, технология и оборудование: учеб. пособие / К.Г. Бутовский, В.Н. Лясников. – Саратов: СГТУ, 2000. – 118 с.
2. Мурзин С.П. Тепловое воздействие на материалы комбинированных энергетических потоков при плазменно-лазерном нанесении покрытий / С.П. Мурзин // Лазерная техника и технология. – 2002. – №2. – С. 81-86.
3. Папшев В.А. Модификация плазмонапыленных гидроксипатитовых покрытий лазерным излучением / В.А. Папшев [и др] // Проблемы оптической физики и биофотоники: материалы 13-й Междунар. молодеж. науч. школы по оптике, лазерной физике и биофизике. – Саратов, 2009. – С. 73-77.
4. Калита В.И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой / В.И. Калита, Д.И. Комлев. – М.: Лидер, 2008. – 388 с.

УДК 621. 311

ВНЕДРЕНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

И.А. Ростунцова, В.А. Еров

СГТУ имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, Россия

Тел.89271341008; E-mail Rostunzeva@mail.ru

Определена возможность применения высокоэффективных поверхностей нагрева с учетом внедрения оребрения. Составлены методические положения по определению конструктивных параметров и параметров теплообмена поверхностей нагрева котельных установок при проведении модернизации путем внедрения оребренных поверхностей нагрева.

Ключевые слова: высокоэффективная поверхность нагрева, удельная теплопроизводительность ребра, тепловосприятие поверхности теплообмена, коэффициент тепловой эффективности, искусственная турбулизация.

IMPLEMENTATION OF HIGH HEATING SURFACE MODERNIZATION OF THE EQUIPMENT TPP

I.A. Rostuntsova, V.A.Yorov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

The possibility of the application of high-efficiency heating surfaces, taking into account the implementation of finning. Composed methodical positions by definition of design parameters and parameters of the heat transfer surfaces of the heating boiler installations during modernization by implementing finned heating surfaces.

Keywords: high-surface heating, the specific heat transfer fins, heat absorption of the heat transfer surface, coefficient of thermal efficiency, artificial turbulence.

Современное состояние отечественной теплоэнергетики можно охарактеризовать следующими особенностями: потребность в электрической энергии существенно сократилась, заметная часть оборудования электростанций простаивает или недогружена, потребность в тепловой энергии сократилась меньше, чем в электрической, и в некоторых районах наблюдается ее дефицит. Основное оборудование многих электростанций выработало свой ресурс, его безотказность снижается, увеличиваются расходы на ремонты, устаревшее оборудование становится все менее экономичным и перестает удовлетворять возрастающим экологическим требованиям, требуется все больше средств на защиту окружающей среды от вредных выбросов электростанций. Для того чтобы избежать сдерживания экономики при ожидаемом ее подъеме, необходимо вывести из эксплуатации отработавшее оборудование, заменить его новым, более экономичным, модернизировать действующие электростанции, а также наращивать общую электрическую и тепловую мощности электростанций при одновременном осуществлении политики энергосбережения в промышленности и быту. При решении этих задач необходимо учитывать следующие изменения в топливоснабжении и стоимости энергооборудования: газомазутные блоки, главным образом, будут снабжаться газом, поскольку поставки мазута в энергетику значительно сокращаются. Известно, что средства для значительного ввода новых мощностей в стране отсутствуют и вряд ли они появятся в ближайшее время. В этих условиях весьма оправдано внедрение малозатратной модернизации оборудования на базе высокоэффективных поверхностей нагрева, в качестве которых рассматриваются поверхности теплообмена с различными видами оребрения.

Теплообменники с ребристыми поверхностями нагрева применяются в тех случаях, когда теплообмен происходит между двумя теплоносителями с большим и малым коэффициентами теплоотдачи. Увеличивая поверхность теплообмена со стороны теплоносителя с малым коэффициентом теплоотдачи путем ее оребрения, увеличивают количество тепла, передаваемого от греющего к нагреваемому теплоносителю [1].

Основными достоинствами оребрения являются: повышение КПД котельной установки; коэффициент теплопередачи увеличивается до 50%;

сокращается расход трубы (металла) до 40%; общий вес теплообменника снижается на 30-40%; ресурс работы поверхности нагрева увеличивается в 2-3 раза [2-4].

Установлено, что с уменьшением толщины ребра снижается абсолютная и увеличивается удельная теплопроизводительность ребра (рис. 1) по данным [3].

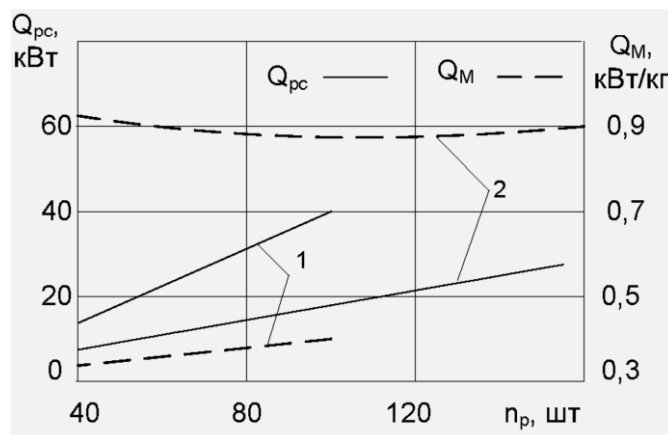


Рис. 1. Зависимость абсолютного ($Q_{рс}$) и удельного (Q_m) количества теплоты от количества ребер (n_p) при их различной толщине:
1- $\delta = 5$ мм; 2- $\delta = 1$ мм

Как видно из рис.1, применение развитых поверхностей нагрева при их оребрении позволяет увеличить теплообмен за счет искусственной турбулизации, вследствие чего увеличивается тепловосприятие поверхности нагрева (Q_T , кДж/с). В то же время оребрение поверхности нагрева позволяет достичь оптимальное уменьшение диаметра труб, что дает возможность снизить общие габариты поверхности теплообмена. Увеличение тепловосприятия поверхности теплообмена обеспечит более глубокое снижение температуры уходящих газов в котле - t_{yx} , повышая его КПД и снижая тем самым расход топлива на котел. При этом эффективность от оребрения будет тем выше, чем низкопотенциальнее будет поверхность нагрева.

Определяем площадь поверхности теплообмена с учетом оребрения.

Число трубок в одном ряду:

$$Z_1 = \frac{Q_1}{S_1} - 1 = \frac{13,5}{0,0704} - 1, \quad (1)$$

где $Z_1 = 190$, $\delta = 0,006$,

$$\alpha_{2п} = \alpha_H \cdot C_d = 3100 \cdot 1,1 = 3410 \quad \frac{Вт}{м^2 \cdot K} \quad - \text{коэффициент теплоотдачи от}$$

стенки к пару;

α_2 - коэффициент теплоотдачи от газа к стенке:

$$\alpha_2 = \alpha_2 \cdot C_d = 3200 \cdot 1,1 = 3520 \frac{Вт}{м^2 \cdot К},$$

α_1 - коэффициент теплоотдачи от газа к стенке;

$$\alpha_1 = \xi(a_K + a_L) = 1 \cdot (20 + 90) = 111 \frac{Вт}{м^2 \cdot К},$$

где a_K - конвективная теплоотдача; a_L - теплоотдача излучением.

Коэффициент теплопередачи определится как:

$$K = \psi \frac{a_1 \cdot a_2}{a_1 + a_2} = 0,85 \cdot \frac{111 \cdot 3520}{111 + 3520} = 91, \quad (2)$$

где ψ - коэффициент тепловой эффективности.

Площадь поверхности теплообмена будет равна:

$$F_{ребр} = \frac{Q_0 \cdot B_p \cdot 10^3}{K \cdot \Delta T} = \frac{2698 \cdot 11,25 \cdot 10^3}{91 \cdot 400} = 758 \text{ м}^2. \quad (3)$$

Число рядов труб в пучке $Z_2 = Z_{нет} \cdot Z_p \cdot Z_3 \cdot 2 = 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 3 = 12 \Rightarrow 2280$ трубок в одном пучке.

Глубина пакета $h_{пак} = Z_2 \cdot S_2 + d = 12 \cdot 0,0064 + 0,032 = 0,8 \text{ м}$.

Выбираем материал: сталь 12×1МФ. Коэффициент теплопроводности материала $\lambda_m = 34,5 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$.

Принимаем наружный диаметр ребер $D=55 \text{ мм}$, толщина $\delta_{ребр}=0,3\text{мм}$.

Теплопроводность ребер $\lambda_p = 20 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$.

Шаг ребер $v=20 \text{ мм}$.

Рассчитаем приведенный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{2np} = \alpha_2 \cdot \left(\frac{F_p}{F_{pc}} \cdot \frac{Q_0}{Q_1} \cdot \frac{F_{II}}{F_{pc}} \right). \quad (4)$$

Число ребер на 1 м длины трубки равно: $n = \frac{1000}{v} = \frac{1000}{20} = 50$.

Поверхность ребер:

$$F_p = \frac{2\pi n \cdot (D^2 - d^2) \cdot h}{4} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (0,055^2 - 0,032^2)}{4} = 0,63 \frac{м^2}{м}.$$

Поверхность 1 м длины трубы, свободная от ребер: $F_n = \pi d n - n \pi d_H \cdot \delta$

$$F_n = 3,14 \cdot 0,032 - 50 \cdot 3,14 \cdot 0,032 - 0,006 = 0,07 \frac{м^2}{м}.$$

Полная внешняя ребристая поверхность:

$$F_{pc} = F_p + F_n = 0,63 + 0,07 = 0,7 \frac{\text{м}^2}{\text{м}}.$$

$$\text{Поправочный коэффициент : } \frac{Q_0}{Q_1} = \frac{4 \cdot \phi \cdot d_H}{m \cdot (D^2 - d_H^2)}.$$

Предварительно находим: $m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_2}{\lambda_p \cdot \delta}} \Rightarrow$ по рисунку находим, что коэффициент $\phi = 1,21$.

$$\frac{Q_0}{Q_1} = \frac{4 \cdot 1,21 \cdot 0,032}{242,2 \cdot (0,055^2 - 0,032^2)} = 0,32.$$

$$\alpha_{2np} = 3520 \cdot \left(\frac{0,63}{0,7} \cdot 0,32 + \frac{0,07}{0,7} \right) = 1365,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

$$\text{Коэффициент теплоотдачи от стенки к пару } \alpha_{1п} = 3410 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Определяем коэффициент теплоотдачи чистой трубки, отнесенной к ребристой поверхности:

$$k_{pc} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} \right) \cdot \left(\frac{F_{pc}}{\alpha_{2np}} \right)}, \quad (5)$$

$$F_c = \pi \cdot d_{вн} = 3,14 \cdot 0,03 = 0,0942 \frac{\text{м}^2}{\text{м}} - \text{внутренняя поверхность трубы.}$$

$$\frac{F_{pc}}{F_c} = 0,7 \cdot 0,0942 = 7,43 - \text{коэффициент оребрения.}$$

$$k_{pc} = \frac{1}{\left(\frac{1}{3410} + \frac{0,001}{34,5} \right) \cdot 7,43 + \frac{1}{1365,76}} = 333,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}.$$

$$\text{Коэффициент теплоотдачи для чистой оребренной трубки} \\ K_c = \frac{K_{pc} \cdot F_{pc}}{F_c} = 333,3 \cdot 7,43 = 2476,42 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}.$$

С помощью результата расчета найдем новую поверхность теплообмена:

$$F_{оробр} = \frac{Q_0 \cdot B_p \cdot 10^3}{K \cdot \Delta T} = \frac{2698 \cdot 11,25 \cdot 10^3}{333,3 \cdot 440} = 207 \text{ м}^2.$$

Расчеты уменьшения температуры уходящих газов, потерь тепла с уходящими газами и изменения расхода топлива на котел приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчет тепловой экономичности внедрения оребренного водяного экономайзера на энергетическом котле ТГМ-96Б

Наименование показателя	Обозначение	Размерность	Расчетные формулы	Значение показателя
Уменьшение температуры уходящих газов при внедрении оребренной поверхности	Δt_{yx}	$^{\circ}\text{C}$	$T_{п}-Q_{г}\cdot 10^6)/\Delta F_{\text{оребр}}(k_{вэ(р)}-k_{вэ}))$	1,3
Температура уходящих газов с учетом оребрения	t_{yx}	$^{\circ}\text{C}$	$t_{yx}-\Delta t_{yx(р)}$	157,7
Теоретические объемы: -дымовых газов	$V_{г(0)}$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	по данным [4]	10,20
-воздуха	V_0	$\text{м}^3/\text{м}^3$	по данным [4]	8,99
Объем уходящих газов при $\alpha=1,13$	V_p	$\text{м}^3/\text{м}^3$	$V_{p(0)}+(\alpha_{yx})V_0$	11,37
Энтальпия уходящих газов при $C_p=1,097$ кДж/м ³ ·С	$H_{г(0)}$	кДж/м ³	$V_p\cdot C_p\cdot t_{yx}$	1966,6
Потеря тепла с уходящими газами при $Q_2=H_g$ и $Q_{н(р)}=33,93$ кДж/нм ³	q_2	в долях	$Q_2/Q_{н(р)}$	0,057
КПД котла при применении оребренных поверхностей	η	%	$1- q_2$	0,942
Расход топлива на котел с учетом оребрения	B	$\text{м}^3/\text{с}$	$Q_{ка}/\eta\cdot Q_{н(р)}$	8,11
Уменьшение расхода топлива на котел	ΔB	$\text{м}^3/\text{с}$	$B - B_p$	0,077
Число часов использования максимальной нагрузки котла	h_{max}	ч/год	принято	3500
Годовая экономия топлива	$\Delta B_{p(\text{год})}$	тыс. м ³ /год	$\Delta B_p\cdot h_{\text{max}}$	969,5
Экономия затрат на топливо при оребрении	ΔZ_T	млн. руб/год	$\Delta B_{p(\text{газ})}\cdot \Pi_{\text{газ}}$	1,163

Оценка экономической эффективности оребрения проводится через максимум интегрального экономического эффекта за весь срок службы оборудования:

$$\mathcal{E}_{\text{инт}} = \sum (R_t - Z_t) \cdot (1 + \alpha)^{-1}, \text{ руб}, \quad (6)$$

где t - номер шага расчета; T - горизонт расчета; R_t - результаты шага расчета; Z_t - затраты на t -м шаге расчета; α - норма дисконта;

$$R_t = \Delta Z_t + \Delta B_t, \text{ руб/год}, \quad (7)$$

ΔZ_t - снижение затрат в общую площадь поверхности нагрева воздухоподогревателя вследствие применения ребер, руб/год:

$$\Delta Z_t = C_m \cdot \Delta F_{\text{рп}}, \quad (8)$$

ΔB_t - снижение расхода топлива на котел вследствие увеличения КПД и снижения температуры уходящих газов, руб/год.

Затраты на оребрение:

$$Z_t = K_{\text{рп}} + I_{\text{рп}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{рп}} = C_m \cdot F_{\text{рп}}$ - капитальные вложения в оребренную поверхность; $I_{\text{рп}}$ - издержки на монтаж и сварочные работы.

По результатам расчета получены следующие показатели экономической эффективности при горизонте расчета 10 лет (табл. 2).

Таблица 2. Показатели экономической эффективности внедрения оребренных поверхностей нагрева

Показатели эффективности	Единицы измерения	Численное значение
Чистый дисконтированный доход	млн.руб	21477,2
Индекс доходности	руб/руб	2,89
Внутренняя норма доходности	%	37,65
Дисконтированный срок окупаемости	лет	4,7

Выводы

Определена возможность применения высокоэффективных поверхностей нагрева с учетом внедрения оребрения.

Составлены методические положения по определению конструктивных параметров и параметров теплообмена поверхностей нагрева котельных установок при проведении модернизации путем внедрения оребренных поверхностей нагрева.

Разработанные методические положения дают возможность использования предлагаемых решений при проектировании строительства и модернизации электрических станций теплофикационного типа (ТЭЦ) в Российской Федерации, а также использования полученной методики в учебных целях при подготовке специалистов и бакалавров в области энергетики.

Список литературы

1. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции/ В.Я. Рыжкин.- М.: Энергоатомиздат, 1987.– 328 с.
2. Резников М.И. Паровые котлы тепловых электростанций/ М.И. Резников, Ю.М. Липов.– М.: Энергоиздат, 1981. – 250 с.
3. Киселев Н.А. Котельные установки/ Н.А. Киселев.– М.: Высшая школа, 1979.–160 с.
4. Медведев В.А. Определение оптимальной ширины межтрубной проставки в мембранных экономайзерах парогенераторов/ В.А. Медведев // Известия вузов. Энергетика. –1977.– № 8. –С. 60-65.
5. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – СПб.: Изд-во ВТИ-ЦКТИ, 1998.– 296 с.

УДК 621.922.02

МОДИФИКАЦИЯ СВЯЗКИ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ПОЛУФАБРИКАТОВ ПРИ НАГРЕВЕ В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОМ ПОЛЕ

Н.И. Веткасов, Л.В. Худобин, В.В. Сапунов

УлГТУ, г. Ульяновск, Россия

Тел. (8422) 418247, E-mail: nppwt@ulstu.ru

Представлены результаты исследования влияния модификации связки на процесс ее полимеризации при нагреве полуфабрикатов абразивных инструментов в СВЧ-поле. В качестве модификаторов (добавок) использовали гипс полуводный, сульфат магния безводный; бентонит; продукт «К», представляющий собой мелкодиспергированный порошок растительного происхождения, и графит серебристый. Фиксировали скорость нагрева полуфабриката при определенной мощности СВЧ-излучения, убыль массы, твердость, геометрические параметры и внешний вид полуфабрикатов после термообработки. Выявлена возможность повышения производительности процесса СВЧ-бакелизации полуфабрикатов абразивных инструментов (АИ) путем модификации связки.

Ключевые слова: абразивный инструмент, бакелитовая связка, сверхвысокочастотная (СВЧ) термообработка, модификатор, графит серебристый, сульфат магния, гипс.

MODIFICATION OF ABRASIVE TOOLS BOND FOR ACCELERATION POLYMERIZATION OF SEMI-FINISHED PRODUCTS AT HEATING IN SUPER HIGHLY QUALITY FIELD

N.I. Vetkasov, L.V. Khudobin, V.V. Sapunov
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

There are given the results of investigation influence on bond modification on the process of its polymerization at the heating of semi-finished products of abrasive tools in a microwave field. As excipients were used gypsum hemihydrate, anhydrous magnesium sulphate; bentonic; product "K", which is a finely dispersed powder of vegetable origin and graphite metallic. During the study, the heating rate was fixed at a certain semi-power microwave radiation, mass loss, hardness and geometric parameters of semi-finished product appearance after heat treatment. It was found the possibility make it higher the process performance of microwave bakelization of semi-finished abrasive tools on bakelite bond by bond modernization.

Keywords: abrasive tool, bakelite bond, the microwave (MW) heat treatment, modifier, graphite silver, magnesium sulfate, gypsum.

В технологических процессах изготовления АИ на органических термореактивных связках (бакелитовой, вулканиновой и др.) наиболее длительной и энергоемкой операцией является термообработка полуфабрикатов, обеспечивающая полимеризацию связки АИ. Производительность этой операции, выполняемой, как правило, в печах-бакелитаторах, определяется скоростью конвективного нагрева полуфабрикатов в воздушной среде. От скорости нагрева, в свою очередь, зависит интенсивность образования и выделения из полуфабриката летучих веществ, что при критических скоростях нагрева приводит к деформации (вспучиванию) полуфабрикатов.

Радикальным средством многократного повышения производительности операции термообработки полуфабрикатов АИ на органических термореактивных связках (ОТС) является применение сверхвысокочастотного (микроволнового) излучения.

В Ульяновском государственном техническом университете создана оригинальная СВЧ-установка с разовой загрузкой полуфабрикатов АИ массой до 180 кг. Длительность операции термообработки (бакелитации) партии полуфабрикатов на этой установке не превышает пяти часов (в зависимости от размеров и массы полуфабрикатов), что в 6 – 8 раз меньше, чем при традиционном использовании конвективного нагрева [1].

Основным препятствием для дальнейшего повышения производительности СВЧ-термообработки полуфабрикатов на ОТС остается интенсивное выделение летучих веществ в диапазоне критических температур, когда полуфабрикаты еще окончательно не

отвердели (не закончился процесс полимеризации связки). В связи с этим возрастает актуальность проблемы снижения количества (массы) летучих веществ, выделяющихся при термообработке полуфабрикатов АИ.

Вторая проблема связана с необходимостью «индивидуализации» программируемых циклов СВЧ-термообработки полуфабрикатов, обусловленной различиями и рассеиванием в партии полуфабрикатов физико-химических свойств и степени радиопрозрачности материалов, из которых «скомпанованы» АИ. Например, зерна электрокорунда нормального и карбида кремния быстро нагреваются в СВЧ-поле, тогда как при термообработке полуфабрикатов на электрокорунде белом возникают определенные трудности, так как этот абразивный материал практически радиопрозрачен.

Установлено, что введение в состав связки АИ даже небольшого количества радиопоглощающего модификатора позволяет существенно повысить скорость нагрева полуфабрикатов в СВЧ-поле. В качестве критерия выбора модификатора использовали диэлектрическую проницаемость материала, представляющую собой комплексное число, мнимая часть которого прямо пропорционально связана со скоростью нагрева полуфабрикатов в СВЧ-поле. В качестве модификатора, способного повысить поглощающие СВЧ-излучение свойства полуфабрикатов, использовали графит серебристый.

Расчет удельного количества летучих веществ, выделяющихся при бакелизации полуфабрикатов АИ, показал, что доминирующее влияние на процесс деформации полуфабрикатов оказывают пары воды, которые составляют 73 % по объему от общего объема всех летучих веществ. Связывание этих паров является первоочередной задачей для обеспечения возможности повышения скорости нагрева полуфабрикатов при их бакелизации. На возможность решения этой задачи при конвективной термообработке указывают исследования А.В. Никитина [2], показавшего, что одна молекула дегидратированного сульфата магния способна присоединить к себе до семи молекул воды, при этом масса исходного вещества увеличивается более чем в два раза. В наших исследованиях для решения этой задачи применительно к термообработке полуфабрикатов в СВЧ-поле подобрали несколько модификаторов-адсорбентов, способных связать пары воды с образованием твердых веществ.

В качестве адсорбирующих модификаторов, способных снизить выход летучих веществ в критическом диапазоне температур (80...120 °С), при которых возможно вспучивание полуфабрикатов, использовали: сульфат магния безводный; бентонит; продукт «К». Содержанием модификаторов связки варьировали в диапазоне от 1,5 до 4,5 % массы абразивного материала. В качестве базовой рецептуры при изготовлении контрольных образцов шлифовального круга выбрали связку, содержащую

в качестве добавки гипс полуводный в количестве 1,5 % от массы абразива.

Разработана методика оценки эффективности использования модификаторов при изготовлении АИ на бакелитовом связующем по следующим основным критериям:

- обеспечение максимально допустимой скорости нагрева полуфабрикатов;
- сохранение задаваемых при формовке геометрических параметров полуфабрикатов (при отсутствии трещин и вспучиваний);
- снижение влияния релаксации технологических остаточных напряжений на размеры и форму АИ;
- обеспечение работоспособности АИ на уровне контрольных образцов.

На первом этапе экспериментов готовили навески сырьевых материалов:

- сыпучих материалов, включая и материал модификатора;
- жидких – с помощью дозатора-шприца.

Навески размещали в промежуточной таре. Затем приготавливали формовочную смесь: в быстроходный смеситель при вращающемся роторе вводили, согласно рецептуре, компоненты смеси и перемешивали их до получения на каждой стадии равномерно перемешанной массы с допустимым образованием отдельных комков размером не более 3 мм. Последовательно вводили:

- абразивный материал (шлифзерно);
- смолу-увлажнитель Абразит-031;
- смолу-связующее СФП-012А3, содержащую модификатор.

Рецептуры формовочных смесей, использованные для изготовления полуфабрикатов ШК, представлены в табл. 1.

Полученную смесь высыпали на сито устройства рассеивания и просеивали под собственным весом. Оставшиеся на сите отдельные комки протирали через сито, чем обеспечивали равномерное нанесение порошкообразных компонентов на поверхность зерен абразива.

Холодную формовку полуфабрикатов ШК типоразмера $1\ 150' 25' 32$ проводили на гидропрессе ПБ-6330 при усилии 1000 кН. Облой и избыток порошкообразных компонентов на поверхности образцов удаляли шпателем и кистью.

Бакелизацию в СВЧ-поле осуществляли в микроволновой печи марки WD90N30ESP-G4 на режимах, при которых скорость нагрева образцов была близка к критической: несколько ниже или выше скорости нагрева в критическом диапазоне температур (80 ... 120 °С), при которых происходит вспучивание образцов ШК, изготовленных без исследуемых модификаторов связки.

Таблица 1. Рецептуры формовочных смесей для изготовления полуфабрикатов шлифовальных кругов (абразивное зерно 25А F80 – 1000 г, увлажнитель Абразит-031 – 45 г, связка СФП-012А3 – 90 г)

№ рецеп-туры	Масса модификаторов связки, г				
	Бентонит	Продукт «К»	Сульфат магния безводный	Графит серебристый	Гипс ГВВС-16
1	–	–	–	–	15
2	–	–	–	–	30
3	–	15	–	–	–
4	60	–	–	–	–
5	–	–	15	–	–
6	–	–	30	–	–
7	–	–	45	–	–
8	–	–	60	–	–
9	–	–	–	20	–
10	–	–	15	20	–
11	–	–	30	20	–
12	–	–	45	20	–

СВЧ-нагрев проводили циклами: излучение – 2 мин, пауза – 5 мин; излучение – 2 мин и т.д. Температурой нагрева управляли, задавая изменение средней мощности излучения СВЧ-генератора (из ряда 40, 50, 70, 80 и 100 %, что соответствовало удельной мощности нагрева образцов 22,8; 28,5; 40; 45,7; 57 Вт/кг) и длительность нагрева при этих средних мощностях.

Нагревали одновременно 4 образца, уложенных стопкой, укрытой теплоизолирующей радиопрозрачной муллитокремнеземистой ватой МКРВ-130, в микроволновой рабочей камере объемом 30 л. На рис. 1 показана схема укладки образцов в условиях эффективной тепловой изоляции: вата выполняет функцию термостата, изолируя полуфабрикат от негативного воздействия потока холодного воздуха, поступающего в камеру СВЧ-установки и эвакуирующего из нее летучие вещества, выделяющиеся при полимеризации связки.

По ходу операции термообработки полуфабрикатов контролировали:

- исходную и остаточную массу полуфабрикатов, убыль массы после термообработки с помощью весов электронных модели ВК-3000;
- температуру в заданной информативной точке контроля Т (см. рис. 1) – с помощью ИК пирометра Optris MS Plus и мультиметра «Mastech» марки МТ-838 с термопарой ХА;
- дефекты формы и геометрии ШК (штангенциркуль, микрометр);
- цвет поверхности образцов (визуально);
- твердость образцов на приборе «Импульс».

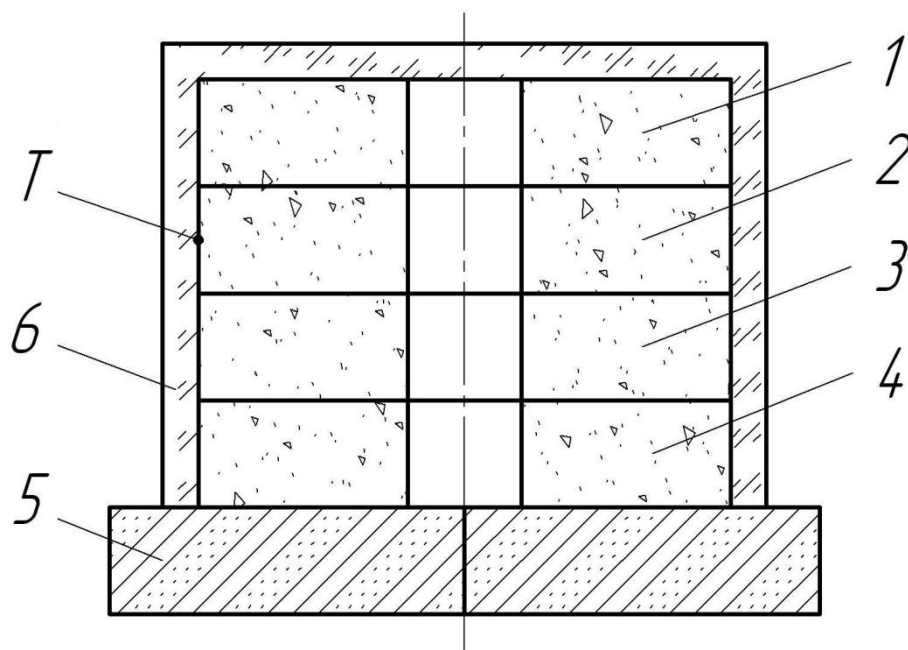


Рис. 1. Схема укладки полуфабрикатов ШК для СВЧ-термообработки и контрольная точка Т замера температуры: 1 – 4 – полуфабрикаты ШК; 5 – теплоизолирующее основание из диатомитового кирпича марки 400; 6 – муллитокремнеземистая вата

Изменение массы полуфабрикатов в процессе термообработки представлено в табл. 2, режимы термообработки и результаты замера температуры в процессе нагрева полуфабрикатов – в табл. 3.

Таблица 2. Изменение массы полуфабрикатов в процессе термообработки

№ рецептуры (по табл. 1)	Потеря массы полуфабриката, %	№ рецептуры (по табл. 1)	Потеря массы полуфабриката, %
1	1,1	7	0,67
2	1,05	8	0,6
3	0,74	9	1,32
4	1,24	10	1,14
5	1,04	11	0,99
6	0,87	12	0,81

Экспериментальные исследования начали с термообработки полуфабрикатов ШК со связкой стандартной рецептуры (№ 1 в табл. 1). За 17 циклов СВЧ-нагрева полуфабрикаты, нагретые до температуры 195 °С, полностью бакелизовались и окрасились в коричневый цвет. Геометрические параметры находились в поле допуска, однако на их торцах были обнаружены небольшие трещины. В следующем опыте № 2 содержание гипса в связке было увеличено в два раза, однако видимого результата это не дало: при полной бакелизации связки были обнаружены трещины на посадочных отверстиях.

Таблица 3. Режимы термообработки и температуры полуфабрикатов в процессе нагрева

№ опы-та	№ рецеп-туры (по табл. 1)	Режим термо-обработки*	Температура полуфабриката, °С										
			Номер цикла СВЧ-нагрева										
			3	5	6	9	10	12	15	17	18	19	21
1	1	100×3-50×9-100×5	90	–	98	111	–	131	–	195	–	–	–
2	2	100×3-50×9-100×5	88	–	96	108	–	130	–	190	–	–	–
3	3	100×5-50×5	–	82	–	–	110	–	–	–	–	–	–
4	4	100×3-50×9-100×5	91	–	99	114	–	134	–	197	–	–	–
5	5	100×3-50×9-100×5	90	–	96	111	–	129	–	196	–	–	–
6	6	100×3-50×9-100×5	89	–	97	111	–	130	–	201	–	–	–
7	7	100×3-50×9-100×5	88	–	95	109	–	126	–	190	–	–	–
8	8	100×3-50×9-100×5	89	–	97	110	–	127	–	193	–	–	–
9	9	100×3-50×9-100×5	–	112	–	–	139	–	–	–	–	–	–
10	9	80×3-50×18	82	–	109	128	–	148	167	–	185	–	203
11	9	80×3-50×7-80×8	76	–	101	120	125	146	171	–	204	–	–
12	9	70×3-40×12-70×3-100×1	85	–	102	121	–	132	–	–	–	194	–
13	10	80×3-50×7-80×8	77	–	100	119	124	143	173	–	201	–	–
14	11	70×3-40×10-80×8	63	–	82	99	–	112	–	–	170	–	198
15	11	70×3-40×12-70×3-100×1	79	–	93	112	–	124	–	–	–	184	–
16	11	80×3-50×18	91	–	111	131	–	150	170	–	189	–	207
17	12	70×3-40×10-80×8	67	–	84	100	–	114	–	–	172	–	200

* - Пример расшифровки режима термообработки «100×3-50×9-100×5»: 3 цикла нагрева с мощностью СВЧ-излучения 100 %, затем 9 циклов с мощностью 50 % и 5 циклов с мощностью 100 %. После каждого цикла нагрева СВЧ-излучением следовала пауза в течение 5 мин при отсутствии СВЧ-излучения.

В опыте № 3 термообработывали полуфабрикаты, содержащие продукт «К», обладающий хорошими сорбционными свойствами. Скорость СВЧ-нагрева полуфабрикатов с этим модификатором была ниже, чем в предыдущих опытах, поэтому режимы термообработки были немного повышены. После десятого цикла СВЧ-нагрева наблюдалась сильная деформация полуфабрикатов, вследствие чего опыт был прекращен. На полуфабрикатах были видны многочисленные трещины, толщина центральной части была увеличена, а посадочное отверстие сужено; цвет полуфабрикатов был ярко-желтый, а потеря массы была меньше, чем в предыдущих опытах, что свидетельствовало о незавершенности процесса полимеризации.

В опыте № 4 в качестве модификатора связки использовали бентонит. Как и в предыдущих опытах, за 17 циклов СВЧ-нагрева модифицированная связка полностью бакелизовалась. Однако, несмотря на большое содержание модификатора (6 % массы абразива), выход летучих веществ (по массе) не уменьшился, полуфабрикаты после термообработки незначительно деформировались, а потеря массы увеличилась по сравнению с базовыми опытами № 1, 2.

В опытах № 5–8 (см. табл. 3) в связку в качестве адсорбирующего модификатора вводили сульфат магния. Режимы термообработки соответствовали опытам № 1, 2. Уже в первом опыте этой серии (№ 5) за 17 циклов СВЧ-нагрева связка полностью бакелизовалась, геометрические параметры находились в поле допуска, трещины и деформации отсутствовали. В опытах № 6–8 (см. табл. 3) содержание сульфата магния наращивали до 3, 4,5 и 6 % массы абразивных зерен. При этом потеря массы полуфабриката снизилась на 42 % (см. табл. 2), что свидетельствует о снижении выхода летучих веществ. Однако, с повышением содержания сульфата магния до 6 % твердость шлифовальных кругов снизилась на 3 пункта.

В девятом опыте в формовочную смесь ввели графит. В результате скорость нагрева полуфабрикатов существенно превысила этот показатель в предыдущих опытах, что привело к их сильной деформации, в связи с чем уже после десятого цикла СВЧ-нагрева опыт был прекращен. В опытах № 10–12 мощность СВЧ-излучения при термообработке полуфабрикатов с модификатором из графита была снижена и подобраны режимы, при которых обеспечивается скорость нагрева, соответствующая опытам № 1, 2. На всех образцах после термообработки были обнаружены небольшие трещины и деформация.

В завершающих опытах № 13–17 в формовочную смесь вводили комбинированный модификатор из графита серебристого и сульфата магния безводного, увеличивая содержание последнего с 1,5 до 4,5 % (соответственно рецептуры № 10, 11, 12 по табл. 1). На всех

термообработанных ШК отсутствовали трещины и деформация, а форма и размеры соответствовали заданным. Скорость распространения звуковой волны в ШК уменьшается по мере увеличения содержания комбинированного модификатора, что свидетельствует о некотором уменьшении твердости ШК.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований выявлены: способность модификаторов органических термореактивных связок ШК предотвращать деформацию полуфабрикатов при их СВЧ-термообработке; закономерности изменения твердости ШК при увеличении содержания в связке некоторых модификаторов; возможность повышения производительности процесса полимеризации бакелитовой связки в СВЧ-поле (в опытах длительность процесса полимеризации связки сократилась с 4,5 до двух с половиной – трех часов при обеспечении требуемого качества ШК).

Реализация ускоренного процесса бакелизации на СВЧ-установке не потребует увеличения ее полезной СВЧ-мощности: ускорение обеспечивается путем замены гипса, используемого в качестве наполнителя, комбинированным модификатором связки, состоящим из обезвоженного сульфата магния, полученного из семиводного сульфата магния (ГОСТ 4523) и графита серебристого (ГОСТ 5279), соответственно в количестве 1,5 и 2 % массы абразивного зерна. Введение в формовочную смесь вместо гипса модификатора связки, представляющего собой смесь адсорбирующих и радиопоглощающих веществ, практически не влияет на коэффициент шлифования, при этом среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности Ra уменьшается до 20 % за счет введения в связку графита, обладающего антифрикционными свойствами [3].

Список литературы

1. Худобин Л.В. Сверхвысокочастотная энергетика в производстве абразивных инструментов и их работоспособность / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов, С.М. Михайлин. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 307 с.
2. Никитин А.В. Метод производства термореактивных полимерных композитов / А.В. Никитин. – SciTecLibrary.ru, 2010.
3. Работоспособность шлифовальных кругов с наполнителями из углеродсодержащих материалов, бакелизованных в СВЧ-поле / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов, С.М. Михайлин, В.В. Сапунов // Вектор науки ТГУ.– 2011.– № 1(15). – С. 56 – 62.

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ
ЛППД АЛМАЗНЫМ ИНДЕНТОРОМ НА ГЛУБИНУ
УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ И ОСТАТОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ
ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

А.В. Мартынюк

МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского, г. Москва, Россия

Тел. 8(495) 915-24-48; E-mail: martm80@list.ru

Исследовано изменение напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое тонкостенных деталей под влиянием локального поверхностного пластического деформирования алмазным индентором и рекомендованы технологические режимы для операций формообразования тонкостенных заготовок данным методом.

Ключевые слова: алмазное выглаживание, упрочненный слой, тонкостенный, индентор, подложка, локальное поверхностное деформирование, формообразование.

**EFFECT OF OPERATING CONDITIONS OF METHOD
LOCAL SURFACE PLASTIC WARPING BY DIAMOND
INDENTER ON DEPTH OF HARDENED LAYER
AND LOCKED-UP CHANGES IN THIN-SLAB PARTS**

A.V. Martynyuk

Russian State University of Aviation Technology, Moscow, Russia

Features of forming hardened layer in thin-slab parts during the local surface plastic warping by diamond indenter have investigated and operating conditions of this method for plastic molding of thin-slab part have recommended.

Key words: diamond ironing, hardened layer, thin-slab, indenter, base plate, local surface warping, plastic molding.

В конструкциях авиационных узлов и агрегатов находят применение упругие тонкостенные детали большой податливости. Они используются в основном в исполнительных механизмах в качестве чувствительных упругих элементов. В данной статье рассматриваются возможности модифицирования поверхностного слоя подобных деталей методом локального поверхностного пластического деформирования алмазным индентором (ЛППД АИ). Алмазное выглаживание является одним из методов отделочно-упрочняющей обработки поверхности пластическим деформированием и заключается в перемещении сферического алмазного инструмента (индентора), нагруженного нормальной силой, относительно деформируемой поверхности [1]. Оно протекает в условиях трения скольжения. Действующие в зоне контакта нормальные и касательные напряжения превышают предел текучести обрабатываемого материала.

Под термином «тонкостенные» подразумеваются детали, толщина которых соизмерима с глубиной модифицированного слоя при ЛППД АИ. Существует возможность сформировать модифицированный слой максимально близко к обрабатываемой поверхности, при этом появляется градиент остаточных напряжений в заготовке по глубине. Уровень данных напряжений достаточен для того, чтобы заготовка деформировалась в определенных пределах, что можно использовать в формообразующих операциях.

Цель исследования: выявление влияния режимов и условий обработки тонкостенных деталей методом ЛППД АИ на глубину модифицированного (упрочненного) слоя и на изменение формы поперечного сечения заготовки и разработки рекомендаций по назначению режимов ЛППД АИ для получения требуемых характеристик поверхностного слоя тонкостенных деталей.

Методика проведения исследований. Обрабатываемый материал – немагнитный коррозионно-стойкий сплав 36НХТЮ, термически обработанный по режиму закалка и дисперсионное твердение ($HV = 3,8-4$ ГПа). Толщина образцов $0,1 \dots 0,15$ мм. В качестве инструмента в экспериментах использовался сферический индентор из природного алмаза. В качестве подложки использовался твердый сплав ВК8 ($HV = 15-16$ ГПа). Предварительно задача взаимодействия сферического инструмента с пакетом заготовка + подложка решалась методом конечных элементов (МКЭ).

В работах [2-4], посвященных отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием деталей и покрытий, приводятся зависимости глубины упрочненного слоя, остаточных напряжений от режимов ЛППД (рис. 1). При этом толщина исследуемых образцов в несколько раз превышает глубину модифицированного слоя.

Из приведенных графиков видно, что глубина модифицированного слоя находится в пределах $0,1 \dots 0,3$ мм, при этом в поверхностном слое преобладают значительные сжимающие остаточные напряжения. Для того, чтобы применить технологию ЛППД к тонкостенным деталям, необходимо уменьшить очаг пластических деформаций и сконцентрировать его вблизи поверхности заготовки. Основными влияющими факторами на глубину упрочненного слоя h_{yc} в данном случае являются: значение силы выглаживания P_y и радиус рабочей части сферического индентора R_u . Поскольку рассматриваются тонкостенные заготовки, в дальнейшем удобнее пользоваться условным (относительным) радиусом индентора R_{ysl} :

$$R_{ysl} = \frac{R_u}{h_{пл}}, \quad (1)$$

где $h_{пл}$ – толщина обрабатываемой заготовки.

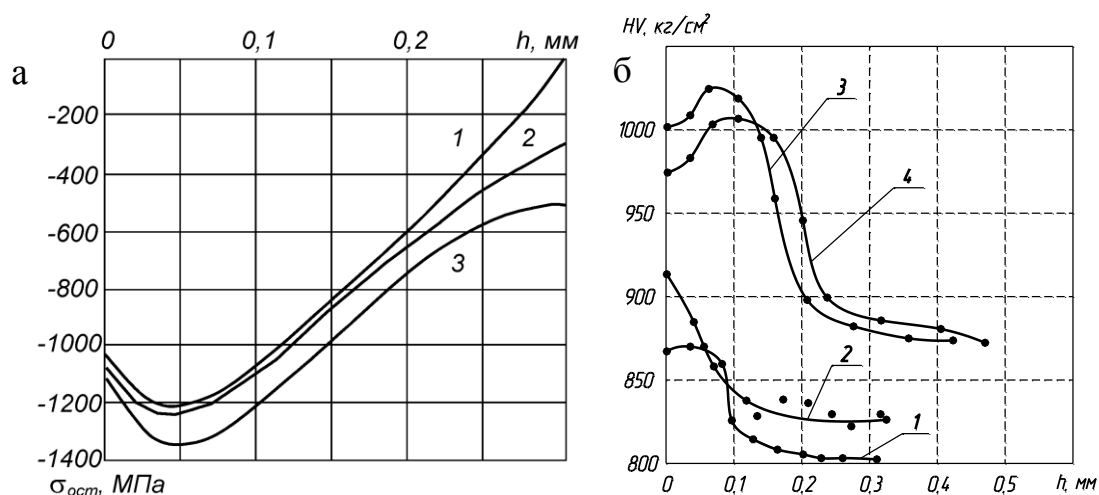


Рис. 1. а - эпюры распределения остаточных напряжений в образцах (кольцах) из сплава 13Х11Н2В2МФ после алмазного выглаживания ($S = 0,05$ мм/об, $R = 2,0$ мм, $v = 40$ м/мин): 1 – $P_y = 150$ Н; 2 – $P_y = 200$ Н; 3 – $P_y = 250$ Н; б - распределение твердости в поверхностном слое образцов после алмазного выглаживания: 1 – ШХ15, $P_y = 50$ Н; 2 – ЭИ347Ш, $P_y = 100$ Н; 3 – P9K5, $P_y = 200$ Н; 4 – P9K5, $P_y = 300$ Н

Рассмотрим распределение напряжений (теория МКЭ) в поперечном сечении канавки, образуемой в процессе внедрения индентора в обрабатываемый материал.

Эпюры напряжений (рис. 2) показывают, что при снижении условного радиуса выглаживателя очаг пластической деформации приближается к поверхности и напряженное состояние в толще заготовки становится более неравномерным. Наоборот, при росте $R_{усл}$ ядро деформации возникает ближе к центральной части листовой заготовки и остаточные формоизменения детали будут минимальны.

В данном исследовании использовались инденторы с рабочей частью в диапазоне $R_{усл} = 0,2 \dots 15$. Как указано выше, с ростом нормальной составляющей силы выглаживания происходит увеличение градиента остаточных напряжений и упрочнение материала, но до определенного предела. К тому же, при обработке ЛППД АИ тонколистовых деталей важно не допустить сквозной пластической деформации и, как следствие, потери устойчивости заготовки и «проваливания» индентора в толщу материала.

Проведенные расчеты (МКЭ) и данные экспериментов выявили степенную зависимость ширины канавки b_0 (следа инструмента) от силы P_y и линейную зависимость глубины упрочненного слоя $h_{ус}$ от ширины канавки b_0 (рис. 3, 4). Аппроксимация экспериментальных точек дала эмпирические зависимости с коэффициентами детерминации R^2 в пределах $0,97 \dots 0,99$, что указывает на хорошую сходимость результатов.

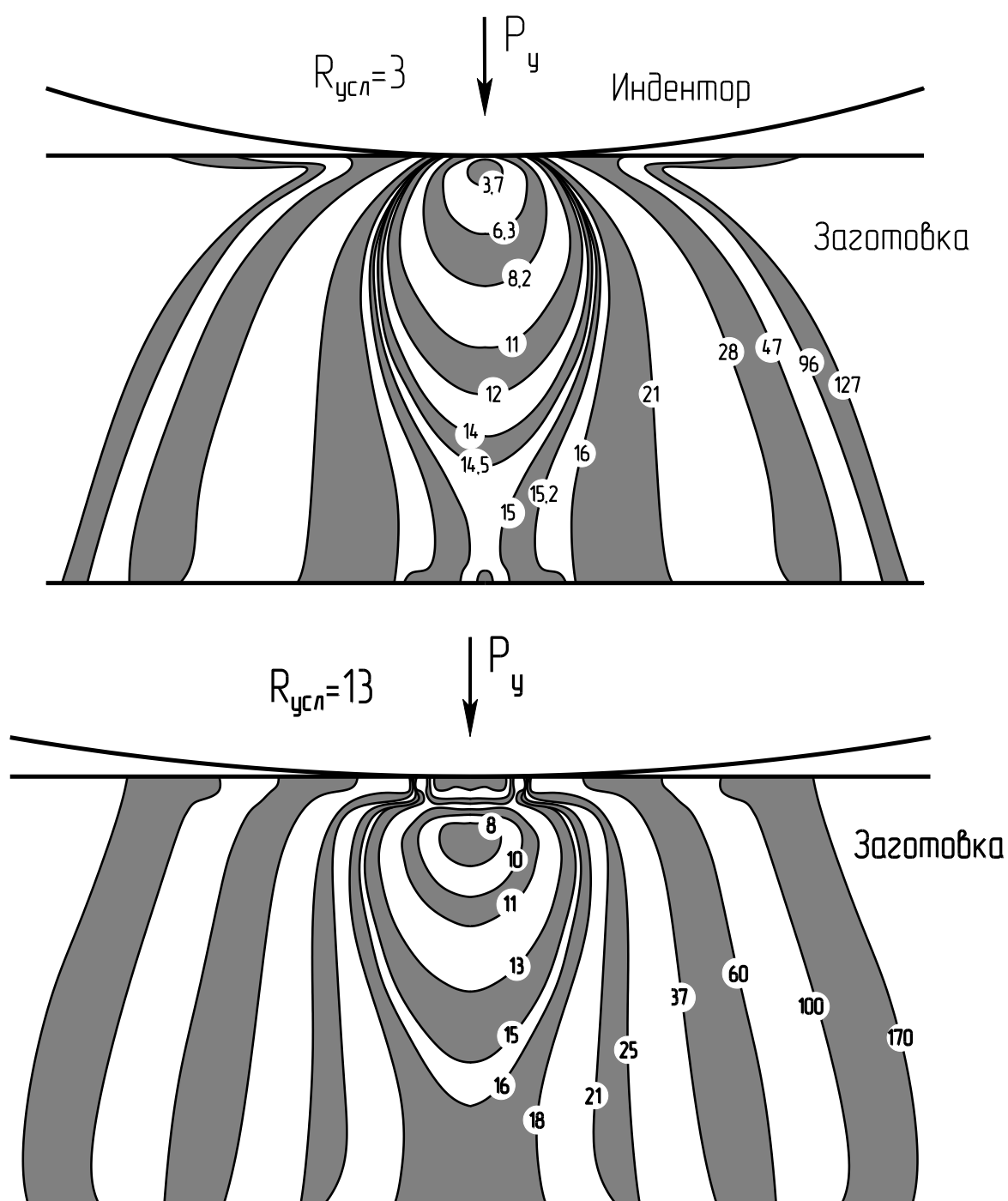


Рис. 2. Напряженное состояние в заготовке в процессе внедрения сферического твердого тела $R_{ysl} = 3$ (вверху) и $R_{ysl} = 13$ (внизу). Цифрами обозначены вертикальные составляющие силы выглаживания P_y и границы областей с превышением предела текучести материала

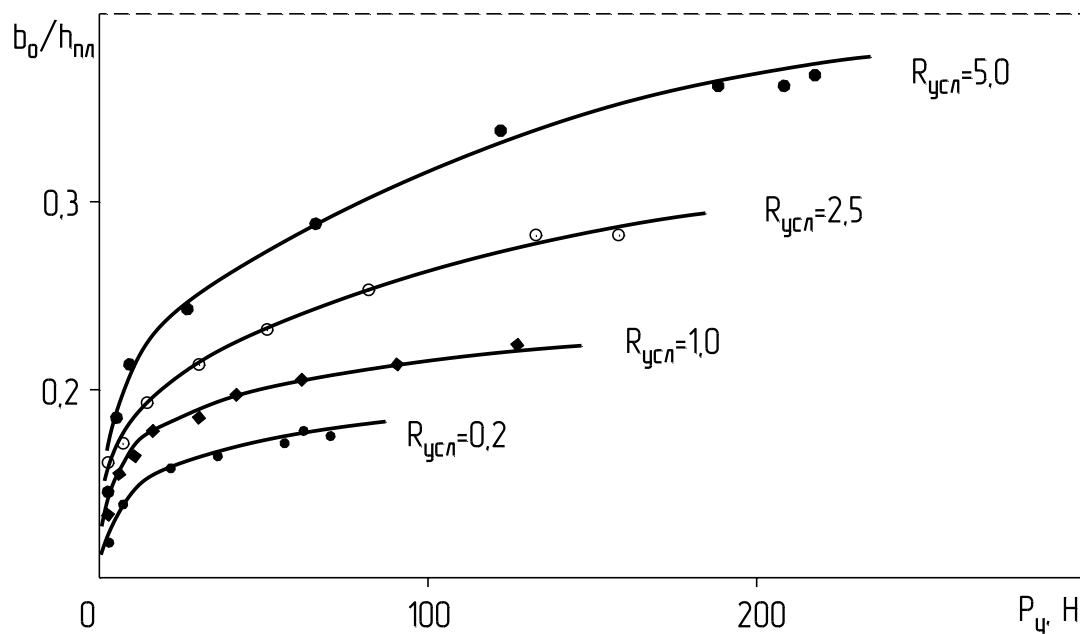


Рис. 3. Зависимость относительной ширины канавки $b_0/h_{пл}$ (следа инструмента) от силы P_y для разных условных радиусов индентора

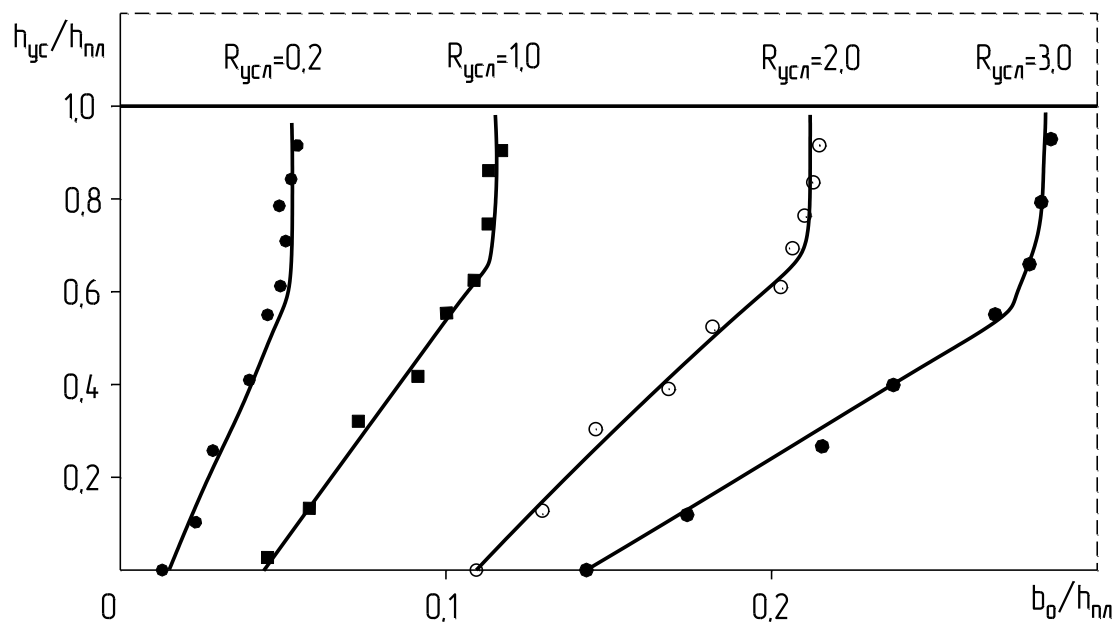


Рис. 4. Зависимость относительной глубины упрочненного слоя $h_{ys}/h_{пл}$ от относительной ширины канавки $b_0/h_{пл}$ для разных условных радиусов индентора

Кривые роста упрочненного слоя (рис. 4) имеют явный излом в верхней части, указывающий на предельное состояние в зоне обработки и наступление сквозной пластической деформации в заготовке. При этом

происходит интенсивное течение материала со стороны подложки (рис. 5) и процесс обработки становится нестабильным

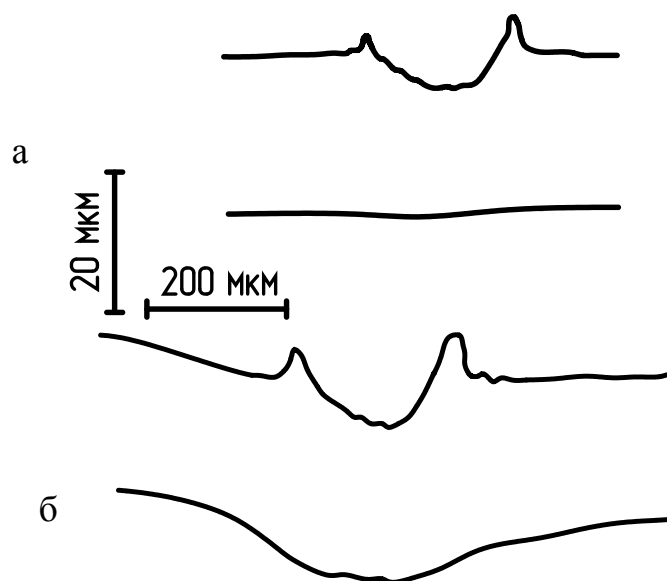


Рис. 5. Профилограммы обработанной ЛППД и обратной поверхностей заготовок (толщина материала условная): а - $P_y = 50$ Н; б - $P_y = 100$ Н, после превышения пороговой силы выглаживания $P_{y, R_{ysl}} = 0,5$

Выводы

На основе данных расчетов (МКЭ) и проверочных экспериментов выявлен оптимальный диапазон радиусов сферы индентора, пригодных для обработки тонкостенных заготовок: $R_{ysl} = 0,2 \dots 3$. В диапазоне $R_{ysl} = 0 \dots 0,2$ происходит интенсивное микрорезание и шелушение поверхностного слоя, при $R_{ysl} > 3$ градиент остаточных напряжений резко снижается и остаточный прогиб заготовки приближается к нулю. Получены данные для расчета критических и оптимальных усилий выглаживания с целью получения максимальных и минимальных остаточных прогибов тонкостенных деталей в результате обработки ЛППД АИ. Все это позволяет применять технологию ЛППД АИ для точных формоизменяющих операций на листовом прокате.

Список литературы

1. Процессы механической и физико-химической обработки в производстве авиационных двигателей / А.Г. Бойцов, А.П. Ковалев, А.С. Новиков и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 584 с.
2. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д.Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.

3. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л. А. Хворостухин, С. В. Шишкин, А. П. Ковалев, Р. А. Ишмаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.

4. Обработка металлопокрытий выглаживанием / Л. А. Хворостухин, В.Н. Машков, В.А. Торпачев, Н.Н. Ильин. – М.: Машиностроение, 1977. – 167 с.

5. Ковалев А.П. Контактно-фрикционное взаимодействие при поверхностном пластическом деформировании / А.П. Ковалев, А.В. Мартынюк // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 8. – С. 14-22.

УДК 685.314.33

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ФТОРПОЛИМЕРОВ

К.К. Скрипаченко, В.А Кошуро, С.Я. Пичхидзе

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Разработана технология склеивания фторсодержащих материалов: резины и ПТФЭ.

Ключевые слова: фторсодержащая резина, политетрафторэтилен, сердечный клапан.

SURFACE MODIFICATION FLUOROPOLYMERS

K.K. Skripachenko, V.A. Koshuro, S.Ya. Pichhidze

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

In article the technology of copolymerization of fluoropolimer is developed: rubber and PTFE.

Key words: fluorine rubber, polytetrafluoroethylene, heart valve.

В современной промышленности широкое применение получили такие материалы, как фторполимеры (ФП). Эти материалы образуются в результате полимеризации фторсодержащих мономеров. Образующиеся ФП, в основном, имеют хорошую стойкость к воздействию химических веществ (кислоты, щелочи, окислители, растворители) даже при высоких температурах, низкий коэффициент трения, широкий диапазон рабочих температур, достаточно высокие механические свойства, являются превосходными диэлектриками, биоинертны и т.д. Все эти свойства позволяют применять ФП в электронике (при изготовлении конденсаторов, изоляции катушек), в машиностроении (при изготовлении подшипников), в медицине (кардиохирургии) [1].

В настоящее время значительному количеству больных в России требуется радикальная коррекция клапанных пороков сердца, возникающих в результате различных болезней и возрастных изменений. Лечение осуществляется кардиохирургическими методами, в том числе установкой протезов клапана сердца (ПКС), среди которых самой востребованной и распространенной является корпусная конструкция с поворотными створками.

В ряде случаев протезирование клапана сердца невозможно в силу неудовлетворительного состояния сердечных сосудов. В связи с этим предлагается устанавливать ПКС, совмещенный путем сополимеризации с искусственным сердечным сосудом в области: пришивная манжета - стенка сердечного сосуда [2].

Наиболее широко в конструкциях ПКС в качестве материала пришивной манжеты используется фетр из политетрафторэтилена (ПТФЭ). ПТФЭ, вследствие особенностей химического строения – инертный ФП, имеющий высокую термостабильность и низкую адгезию к большинству материалов. Для изготовления сердечных стентов и искусственных сосудов наиболее часто применяют фторсодержащие резины и другие ФП.

Для получения прочного соединения ПКС – сердечный сосуд методом сополимеризации необходимо повысить адгезивные способности ПТФЭ и ФП. В промышленности основными способами повышения адгезивных свойств ФП путем дефторирования поверхностного слоя ФП являются электрофизические, физические и химические технологии, зачастую весьма сложные и дорогостоящие [1, 3, 4].

Предлагается для модификации поверхности ФП перед процессом сополимеризации использовать метод магнетронного распыления алюминия, по предварительным данным, позволяющий дегидрофторировать поверхность ФП за счет термохимического воздействия напыляемого материала.

Целью работы является разработка технологии модификации поверхности ПТФЭ и ФП, в частности резины, для последующего их соединения.

Для проведения исследований использовались стандартные образцы из фторсодержащей резины 420-264В/5 на основе СКФ-264В/5 перекисной вулканизации и ПТФЭ, представляющие собой пластины размерами 50×50×2 мм и 90×90×1 мм. Перед нанесением покрытия образцы подвергались очистке в ультразвуковой ванне УЗВ2-0,16/37:

1) в водном растворе ПАВ при температуре от 35 до 40 °С в течение 3 мин; 2) в водном 40%-ном растворе этилового спирта при 20...25 °С в течение 2 мин; 3) в дистиллированной воде при 20...25 °С в течение 1 мин.

Алюминий на образцы резины и ПТФЭ наносился с помощью магнетронно-распылительной системы (МРС) на основе вакуумного

универсального поста ВУП-4. В качестве ионообразующего газа применялся высокочистый аргон. Магнетронное распыление (МР) алюминия проводилось при давлении газа порядка 10-12 Па, разности потенциалов между катодом и анодом 150-200 В. Скорость роста пленки металла составляла 1-2 нм/с.

Соединение образцов из ПТФЭ и фторсодержащей резины осуществлялось путем совулканизации при 165 -170 °С в течение 5 - 6 мин. Структуры распыленного алюминия и совулканизированного соединения исследовались на шлифах с использованием металлографического микроскопа МИМ8. Оценка толщины нанесенного на ПТФЭ и резину слоя алюминия проводилась на анализаторе геометрических параметров микрообъектов АГПМ6М с использованием программы графической обработки изображений «Металлограф». Адгезионная прочность соединений контрольных образцов из фторсодержащей резины 420-264В/5 и ПТФЭ, а также с нанесенным на поверхность слоем алюминия определялась методом межслоевого расслаивания [5] на универсальной испытательной машине ИР 5082-100.

Метод МР позволяет нанести на основы из резины и ПТФЭ равномерный по структуре слой алюминия толщиной 0,25-0,4 мкм, повторяющий рельеф основы (рис.1).

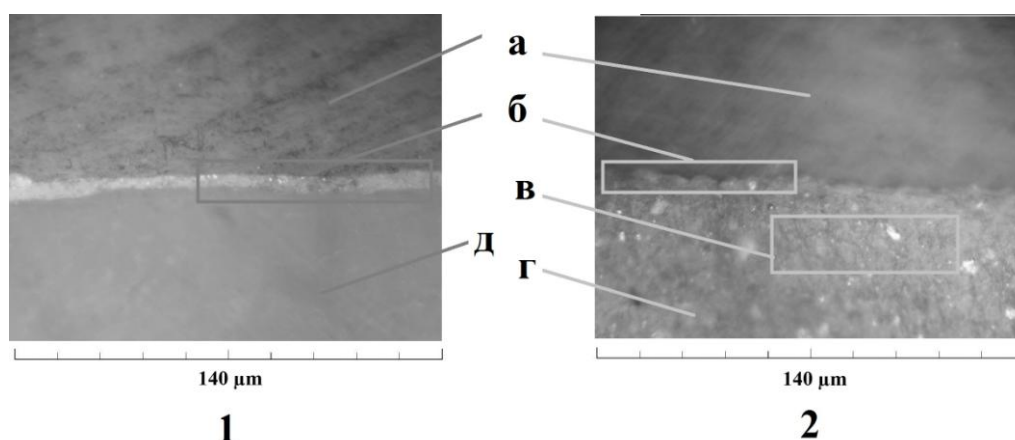


Рис. 1. Фотографии микрошлифов образцов из ПТФЭ (1) резины 420-264В/5 (2) с покрытием алюминия: а – эпоксидная смола; б – нанесенный алюминий; в – область резины с измененной структурой; г – резина 420-264В/5; д – ПТФЭ

В процессе МР алюминия происходит видимое изменение цвета поверхностного слоя основы из ПТФЭ, увеличивается уровень серости в зависимости от времени напыления. После МР металла на подложку из резины 420-264В/5 наблюдается изменение структуры в поверхностных областях материала, рис.1. Предположительно, изменение структуры связано: с термическим воздействием, оказываемым на резину и ПТФЭ плазмой разряда МРС, а также с реакциями дегидрофторирования и дефторирования полимерной цепи фторполимеров (СКФ-264В/5 и ПТФЭ). При изучении ИК - спектров образцов с модифицированной алюминием

поверхностью ФП выявлены полосы поглощения при 713, 881 и 1181 см^{-1} , соответствующие аморфному фториду алюминия.

Анализ химического состава поверхности резины показывает, что ее обработка алюминием толщиной до 10 нм приводит к образованию AlF_3 , при толщине покрытия более 25...30 нм содержание алюминия возрастает, а AlF_3 уменьшается. Представляется важным то, что при получении фторида алюминия на поверхности ПТФЭ, по-видимому, образуется активный углерод, лишенный фтора. Благодаря этому пленка алюминия держится на поверхности ПТФЭ особенно прочно. Соединение образцов из ПТФЭ и резины с Al методом сополимеризации позволяет получить равномерную область контакта (рис.2).

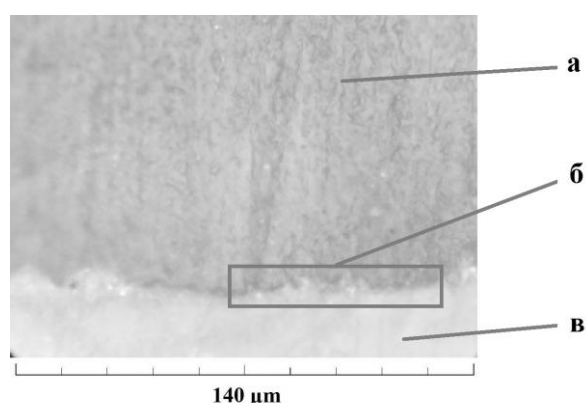


Рис. 2. Фотография микрошлифа соединения ПТФЭ с резиной 420-264B/5 с МР алюминия: а – резина 420-264B/5; б – область соединения ПТФЭ и резины; в – ПТФЭ

В табл. 1 приведены данные по определению адгезионной прочности при расслоении соединения фторсодержащей резины и ПТФЭ.

Таблица 1. Прочность при расслоении соединения «резина – ПТФЭ»

Резина 420 -264B/5	Прочность при расслоении, Н/см	
	ПТФЭ	
	Немодифицированная поверхность	Поверхность, модифицированная алюминием
Немодифицированная поверхность	менее 1	2, 5
Поверхность, модифицированная алюминием	2,3	4, 1

Согласно результатам исследований, приведенным в табл.1, адгезионная прочность соединения ФП увеличивается при использовании поверхностно модифицированных алюминием ПТФЭ и резины, предположительно за счет дефторирования и дегидрофторирования поверхности фторопласта и резины.

Выводы

Адгезионную прочность соединений ФП, полученных путем сополимеризации, можно повысить за счет модификации поверхности соединяемых основ при МР алюминия. Модификация ФП происходит за счет дефторирования и дегидрофторирования поверхностных слоев ФП в процессе магнетронного распыления алюминия.

Список литературы

1. Нудельман З.Н. Фторкаучуки: основы, переработка, применение / З.Н. Нудельман. – М.: ПИФ-РИАС, 2006. – 384 с.
2. Руководство по кардиологии: учеб. пособие: в 3 т. / под ред. Г.И. Сторожакова А.А. Горбаченкова. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008.–Т. 2.– 512 с.
3. Вострокнутов Е.Г. Машины и технология переработки каучуков, полимеров и резиновых смесей / Е.Г. Вострокнутов [и др.]. – Ярославль: ЯПИ, 1972. – 214 с.
4. Патент РФ на изобретение № 2126810. Способ подготовки поверхности полимерных материалов перед склеиванием / Н.В. Булатова, М.Х. Нурутдинов, В.И. Ермаков. – 1999.
5. ГОСТ 6768-75. Резина и прорезиненная ткань. Метод определения прочности связи между слоями при расслоении. – М.: ИПК Изд-во стандартов. – 6 с.

УДК621.78.012

ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИНДУКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ16

М.А. Фомина, А.А. Фомин, Е.Ю. Пошивалова, И.В. Родионов

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Тел. +7(937) 267-85-44; E-mail: afominalex@rambler.ru

Описаны характеристики микро- и наноструктуры оксидных биосовместимых покрытий, полученных на поверхности конструкционного титанового сплава ВТ16 при теплофизическом воздействии токов высокой частоты. Установлено, что применение индукционно-термической обработки малогабаритных металлоконструкций обеспечивает получение на их поверхности наноструктурированных покрытий, а также позволяет повысить их физико-механические характеристики, в частности твердость и модуль упругости.

Ключевые слова: титан, индукционно-термическая обработка, оксидное покрытие, наноструктура, биосовместимость, твердость.

PHASE-STRUCTURAL CHARACTERISTICS, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF OXIDE COATINGS OBTAINED BY INDUCTION HEAT TREATMENT OF TITANIUM ALLOY VT16

M.A. Fomina, A.A. Fomin, E.Yu. Poshivalova, I.V. Rodionov
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

The article describes the characteristics of micro- and nanostructure of oxide biocompatible coatings obtained on the surface of titanium alloy VT16 at thermophysical exposure to high frequency currents. It has been established that the application of induction heat treatment for small metal items provides nanostructured coatings on their surface and also enables to improve their physical and mechanical properties, especially hardness and elasticity modulus.

Keywords: titanium, induction heat treatment, oxide coating, nanostructure, biocompatibility, hardness.

Металлические материалы, используемые в имплантологии и эндопротезировании, представлены различными металлами (например, титаном BT1-0, BT1-00) и их конструкционными сплавами (BT6, BT16) [1-3]. Современные чрескостные имплантаты (остеофиксаторы) и стоматологические внутрикостные имплантаты представляют собой металлическую малогабаритную конструкцию (ММК) с биосовместимым покрытием [3]. Высокие биофункциональные нагрузки, действующие на имплантируемые ММК и окружающие ткани, должны рассматриваться в едином комплексе. На этапе установки определяется величина натяга [4]. Поверхность имплантата при этих условиях подвергается интенсивному трению и износу [5]. Широкое распространение получили различные методы упрочнения поверхности металлов, основными из которых являются газотермические, химические и электрохимические, а также электрофизические [8, 9]. Основными недостатками данных методов являются значительная энергоемкость и необходимость использования специальных жидкофазных или газообразных веществ. Можно получить упрочненный пористый наноструктурированный материал при использовании комбинации ряда процессов, включающих термическую активацию и напыление [10, 11]. В связи с указанным целью данной работы является изучение влияния режимов перспективного метода индукционно-термической обработки (ИТО) титанового сплава BT16 на химический состав, фазово-структурное состояние и физико-механические свойства получаемых оксидных покрытий на поверхности имплантационных ММК [12-16].

Экспериментальные образцы ММК представляют собой цилиндры из конструкционного ($\alpha+\beta$)-титанового сплава ВТ16. Полученные металлические основы образцов подвергаются механическому микротекстурированию и ультразвуковой очистке в воде и спирте. Далее поверхность подготовленных образцов оксидируется методом ИТО на воздухе [5, 6, 12-16]. В ходе исследований устанавливалось влияние ИТО в диапазоне температуры 600...1200 °С на фазово-структурные и химические изменения, происходящие на поверхности при образовании покрытий. Режимам обработки экспериментальных образцов покрытий присвоена двойная нумерация: первое число соответствует температуре ИТО металлической основы (06 – 600 °С, ..., 12 – 1200 °С), второе – продолжительности процесса термообработки, отсчитываемой в секундах.

Фазово-структурное состояние поверхности образцов после ИТО изучалось с применением рентгенофазового анализа (РФА). Морфология покрытий исследовалась в микро- и нанометровом масштабе с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ) в сочетании с энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным анализом (ЭДРФА) химического состава покрытий и приповерхностного слоя ММК.

Физико-механические свойства (твердость и модуль упругости) оксидных покрытий оценивались методами наноиндентирования.

Проверка биосовместимости изучаемых образцов покрытий проводилась в условиях *in vivo*. Образцы имплантатов с оксидными покрытиями имплантировались в костные фрагменты опытных животных. При этом оценивалась способность к остеоинтеграции (приживлению), т.е. способности к образованию костной ткани вокруг имплантата.

На поверхности титанового сплава ВТ16 при ИТО формируются оксидные покрытия [5, 12, 15]. Фазовый состав поверхности представлен диоксидом титана TiO_2 , находящимся в виде рутила, и титаном различного типа кристаллической структуры (рис. 1, а).

Структура оксидных покрытий обусловлена процессами интенсивного окисления металлической основы ММК при теплофизическом воздействии токов высокой частоты (рис. 1, б, в). Форма кристаллов рутила зависит преимущественно от температуры ИТО, так, при 600 °С образуются округлые зерна, равномерно покрывающие микрорельеф основы (рис. 1, в). С увеличением температуры до 800 °С и продолжительности ИТО свыше 120 с размер кристаллов увеличивается. При температуре ИТО, равной 1000 °С, величина кристаллов оксидного покрытия достигает 200...250 нм. Увеличение продолжительности ИТО свыше 5...10 с приводит к интенсивному разрушению образованного оксидного покрытия. При температуре ИТО 1200 °С происходит интенсивный рост оксидного подслоя. Его структура становится похожей на наружный слой, полученный при ИТО около 1000 °С и продолжительности обработки свыше 10...30 с.

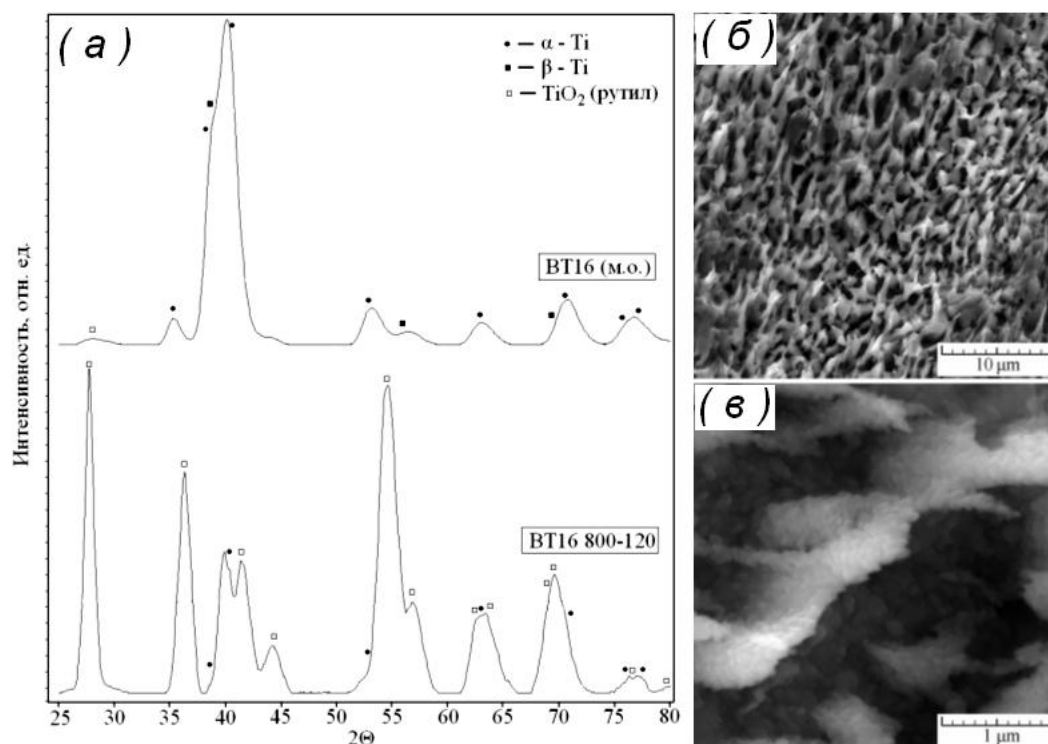


Рис. 1. Данные РФА (а), РЭМ микро- (б) и наноструктуры (в) поверхности образцов ММК из сплава ВТ16, оксидированных по режиму ИТО 800-120

Изменения химического состава, происходящие на поверхности сплава ВТ16, наглядно иллюстрируются при использовании РЭМ в сочетании с ЭДРФА по приготовленным микрошлифам (рис. 2). Образованное покрытие рутила содержит в своем составе, помимо основных компонентов титана и кислорода, примеси алюминия и ванадия (табл. 1).

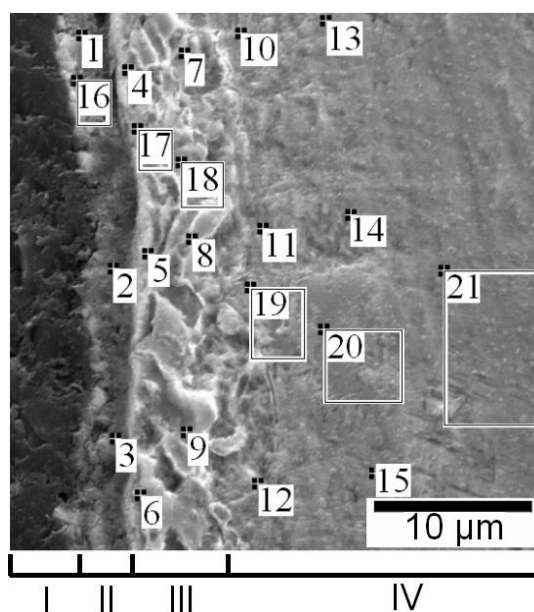


Рис. 2. Микроструктура образца ВТ16 (режим ИТО 1000-120):
I – эпоксидная смола; II – оксидное покрытие; III – термически упрочненная область;
IV – основа ММК

Таблица 1. ЭДРФА образца ММК с покрытием (см. рис. 2)

Спектр	Химический состав, ат. %				
	O	Ti	Al	V	Mo
1	63.67	34.66	0.58	1.09	-
2	69.71	28.75	0.56	0.99	-
3	57.47	37.71	3.67	1.15	-
4	25.80	63.22	4.34	4.15	2.49
5	-	79.63	7.29	8.14	4.94
6	26.71	62.12	3.83	4.62	2.72
7	-	89.00	5.28	3.72	2.00
8	-	87.64	4.90	4.95	2.51
9	-	88.64	4.40	4.89	2.06
10	-	88.40	4.59	4.62	2.38
11	-	89.11	4.46	4.71	1.71
12	-	88.04	5.47	4.51	1.98
13	-	89.69	4.57	3.78	1.96
14	-	88.68	4.77	4.58	1.96
15	-	88.94	4.47	4.68	1.91
16	72.26	26.16	0.85	0.73	-
17	-	86.39	5.51	5.28	2.83
18	-	86.74	6.03	4.84	2.39
19	-	87.91	5.36	4.84	1.89
20	-	88.65	4.72	4.53	2.10
21	-	88.73	4.85	4.22	2.19

Поверхностный слой образцов ММК характеризуется определенными физико-механическими свойствами, в частности твердостью и модулем упругости, выявленными при наноиндентировании (табл. 2).

Таблица 2. Физико-механические свойства оксидных покрытий

Образец	Твердость, ГПа	Модуль упругости, ГПа
BT16	2,9...4,1	238...294
BT16 1200-120 подслои	3,6...4,0	86...95
BT16 1000-030 подслои	5,0...5,5	194...195
BT16 800-120	4,2...5,6	109...153

Проверка биосовместимости *in vivo* образцов ММК с покрытиями TiO_2 произведена с использованием опытных животных – кроликов породы «Серый великан» (рис. 3, б). Представлен также результат лечения собак с использованием имплантатов с покрытием TiO_2 , полученным на сплаве BT16 методом ИТО (рис. 3, а).

Установлено, что высокая морфологическая гетерогенность поверхностной структуры позволяет обеспечить надежную остеоинтеграцию. Микро- и нанометровые углубления и выступы, полученные в ходе предварительной подготовки металлической основы и последующей ИТО, способствуют закреплению костной ткани (рис. 4).

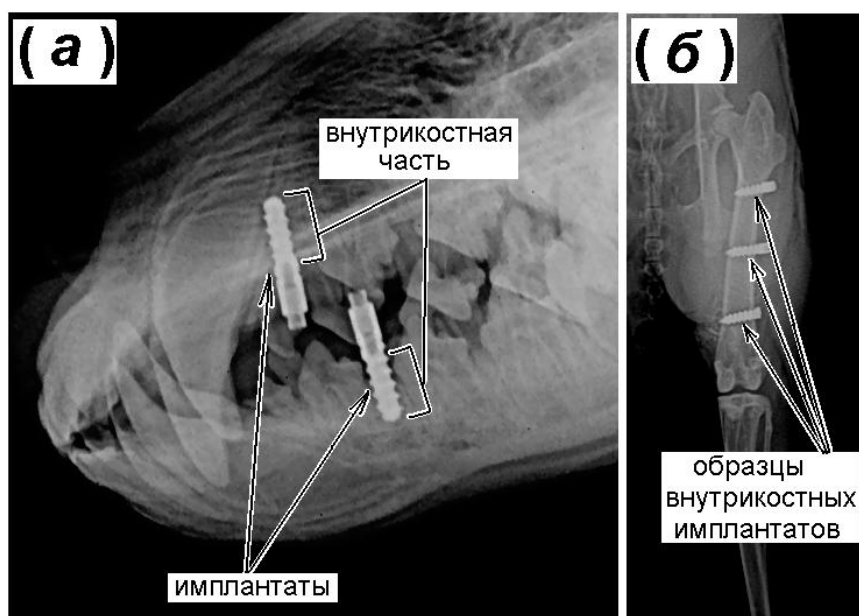


Рис. 3. Рентгенограммы результатов лечения и тестирования *in vivo*

Наличие регулярно расположенных нанометровых элементов на поверхности покрытий улучшает адгезионное взаимодействие между костью и имплантатом. Наиболее наглядно это проявляется при изучении адгезионного (контактного) взаимодействия клеточных элементов (цитоскелета) фибриллярного типа с нанометровыми элементами рельефа поверхности оксидных покрытий (рис. 4, а, б).

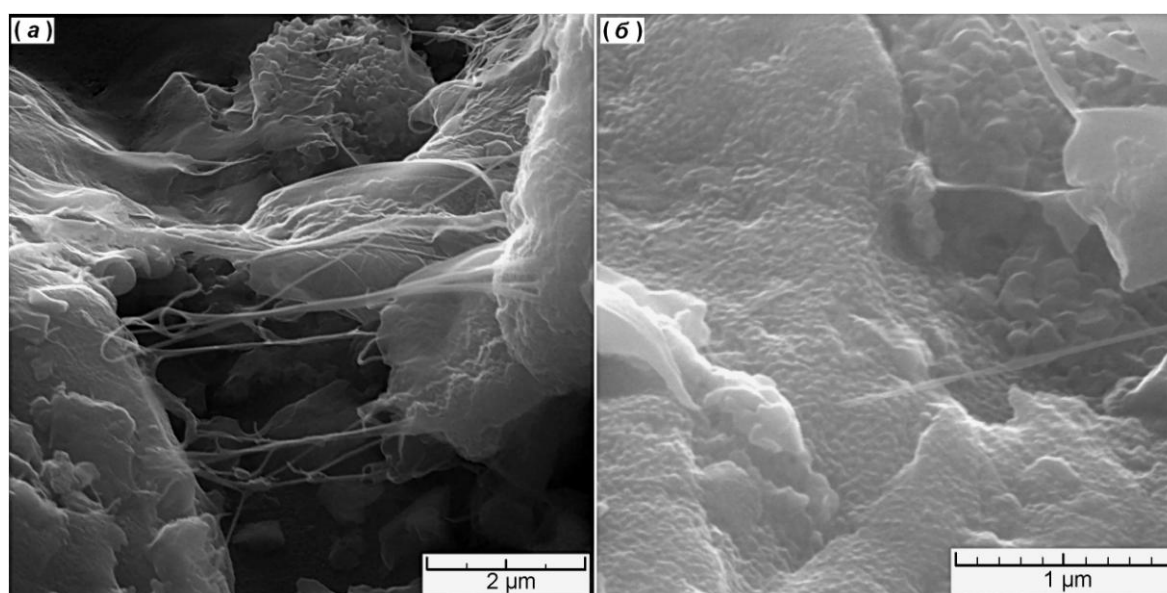


Рис. 4. Морфология границы остеинтеграционного взаимодействия костной ткани с поверхностью наноструктурированного покрытия TiO_2

Структура поверхности титанового сплава BT16 после ИТО характеризуется образованием покрытия диоксида титана с высокими

показателями морфологической гетерогенности микроструктуры, однородности наноструктуры, твердости и биосовместимыми качествами, определенными при тестировании *in vivo*. Наилучшие показатели морфологии в сочетании с высокой твердостью и повышенными качествами биосовместимости достигаются при температуре ИТО от 800 до 1000 °С при продолжительности обработки от 30 до 300 с.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-03-00898 «а», стипендии Президента РФ № СП-1051.2012.4, гранта Президента РФ № МД-97.2013.8, а также проекта № 1189 в рамках базовой части государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки РФ, в сфере научной деятельности.

Список литературы

1. Heimann R.B. Materials Science of Crystalline Bioceramics: A Review of Basic Properties and Applications / R.B. Heimann // CMU Journal. – 2002. – Vol. 1(1). – P. 23-46.
2. Niinomi M. Recent research and development in titanium alloys for biomedical applications and healthcare goods / M. Niinomi // Science and Technology of Advanced Materials. – 2003. – № 4. – P. 445-454.
3. Paital S.R. Calcium phosphate coatings for bio-implant applications: Materials, performance factors, and methodologies / S.R. Paital, N.B. Dahotre // Materials science and engineering R. – 2009. – № 66. – P. 1-70.
4. Экспериментальное исследование процессов остеоинтеграции имплантатов для наружного чрескостного остеосинтеза с различными биокomпозиционными покрытиями / О.В. Бейдик, К.Г. Бутовский и др. // Гений ортопедии. – 2002. – № 4. – С. 80-88.
5. Свойства покрытий диоксида титана, полученных индукционно-термическим оксидированием сплава ВТ1-00 / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов и др. // Трение и износ. – 2014. – Т. 35. – № 1. – С. 43-51.
6. Повышение биосовместимости покрытий диоксида титана, полученных индукционно-термическим оксидированием медицинского титана / А.Б. Штейнгауэр, А.А. Фомин, И.В. Родионов и др. // Медицинская физика. – 2013. – № 4 (60). – С. 83-88.
7. Catledge S.A. Nanostructured surface modifications for biomedical implants / S.A. Catledge, M. Fries, Y.K. Vohra // Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology. – 2004. – № 1. – P. 741-762.
8. Rodionov I.V. Application of the Air-Thermal Oxidation Technology for Producing Biocompatible oxide coatings on periosteal osteofixation devices from stainless steel / I.V. Rodionov // Inorganic materials: Applied research. – 2013. – № 2 (4). – P. 119-126.

9. Кошуро В.А. Влияние плазменных процессов формирования покрытий на механические характеристики изделий из титановых сплавов. / В.А. Кошуро, Г.Г. Нечаев, А.В. Лясникова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 10 (106). – С. 18-22.

10. Нанокристаллическая структура поверхностного слоя гидроксиапатитовых покрытий, сформированных при плазменном напылении с предварительной индукционно-термической обработкой металлической основы / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр и др. // Письма в Журнал технической физики. – 2012. – Т. 38. – Вып. 10. – С. 64-69.

11. Фомин А.А. Биосовместимые наноструктурированные гидроксиапатитовые покрытия и технология их получения плазменно-индукционным напылением / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, В.Н. Лясников // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 6. – С. 35-42.

12. Наноструктура покрытий из диоксида титана, модифицированного гидроксиапатитом, на медицинских титановых имплантатах / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов и др. // Медицинская техника. – 2013. – № 3. – С. 24-27.

13. Оборудование для индукционно-термической обработки малогабаритных металлических изделий / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов и др. // Индукционный нагрев. – 2013. – № 2 (24). – С. 44-47.

14. Нанокристаллическая структура поверхностного слоя технически чистого титана, подвергнутого индукционно-термическому оксидированию / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов и др. // Письма в Журнал технической физики. – 2013. – Т. 39. – Вып. 21. – С. 70-75.

15. Structure of Composite Biocompatible Titania Coatings Modified with Hydroxyapatite Nanoparticles / A.A. Fomin, I.V. Rodionov, A.B. Steinhauer et al. // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 787. – P. 376-381.

16. Nanostructure of biocompatible titania/hydroxyapatite coatings / A.A. Fomin, I.V. Rodionov, A.B. Steinhauer et al. // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 9031. – P. 90310H.

Содержание

Секция 4. Приборостроение, элементы и устройства информационно-измерительных и управляющих систем	3
<i>Голев Д.М., Савочкина М. М. Измерительная установка для проверки механической преобразующей системы волоконно-оптического датчика давления.....</i>	<i>5</i>
<i>Фролов К.С. Проектирование прибора для бесцентрового контроля круглости.....</i>	<i>12</i>
<i>Мохаммед Эль-Гомати, Кадыров И.Ж. Применение нанотехнологий в конструировании плоскпанельных дисплеев.....</i>	<i>17</i>
Секция 5. Металлургия и материаловедение.....	21
<i>Карпова О.О. СВЧ одномодовая камера для выращивания сегнетоэлектрических пленок на основе наноструктурированного титаната бария.....</i>	<i>23</i>
<i>Косарев А. В. , Коваленко Д. О. Математическая модель изменения реологических свойств олигомерных смол в ходе их отверждения.....</i>	<i>26</i>
<i>Перинский В.В., Перинская И.В. Усталостная долговечность ионно-имплантированных конструкционных материалов.....</i>	<i>31</i>
<i>Поскребнева Д.Ю., Королева А.В. Температурное состояние в гранулах вспененного полипропилена в процессе термобарической обработки</i>	<i>33</i>
<i>Поскребнева Д.Ю., Королева А.В. Физико-механические свойства вспененного полипропилена и его перспективность для применения в летательных аппаратах</i>	<i>38</i>
<i>Пошивалова Е.Ю., Родионов И.В., Фомин А.А., Сюсюкин А.Ю. Микро- и наноструктурирование биоконпозиционных бактерицидных покрытий, получаемых на поверхности титановых имплантационных конструкций.....</i>	<i>45</i>
<i>Ромахин А.Н., Родионов И.В., Фомин А.А., Пошивалова Е.Ю. Металлокерамические оксидные покрытия в производстве шнековых осадительных центрифуг из нержавеющей хромоникелевых сталей</i>	<i>49</i>
<i>Нестеров Д.А., Царев В.А. Исследование характеристик целевого двухзазорного резонатора многолучевого двухчастотного СВЧ-прибора.....</i>	<i>57</i>
<i>Цветков С.Е., Копаев Б.В., Степанов В.В. Вакуумная пайка теплообменной аппаратуры из алюминиевых сплавов повышенной прочности</i>	<i>61</i>
Секция 6. Моделирование и информационные технологии в машино- и приборостроении.....	67
<i>Долгих Л. А. Аппроксимативный анализ коротких последовательностей данных.....</i>	<i>69</i>
<i>Сперанский С.К., Лясников В.Н., Сперанский К.С., Потапов А.А. Интеллектуальное управление процессом плазменного напыления с использованием фрактальной геометрии</i>	<i>77</i>

Денисенко А.Ф., Назаров Н.С. Термическое сопротивление плоских станочных стыков.....	83
Парпула С.А., Заярный В.П., Гирич В.С. Моделирование электродинамических характеристик плоских антенн осевого излучения в радиодиапазоне СВЧ и их экспериментальное обоснование.....	91
Данилов И.К., Марусин А.В., Сычёв А.М. Математическая модель процессов, проходящих в топливном насосе высокого давления автотракторных дизелей	98
Решетникова Е.П. Автоматизация процесса измерений деталей со сложными поверхностями в машиностроении	104
Чигиринский Ю.Л., Фирсов И.В. Рациональная логическая модель информационного обеспечения для формализации проектирования планов механической обработки	108
Секция 7. Высокоэнергетические и комбинированные процессы формообразования деталей машино- и приборостроения	119
Грачёв М. В. Электроискровое легирование как средство управления формой тонкостенных деталей.....	121
Злобина И.В., Коломейцев В.А., Бекренев Н.В. Изменение структуры фаршевых композиционных систем под действием СВЧ-излучения	130
Злобина И.В., Коломейцев В.А., Бекренев Н.В. Теоретическое обоснование технологии СВЧ – термической обработки мясных рубленых кулинарных изделий с добавлением муки нута	135
Корпелянский О.Ф.Повышение точности отверстий, обработанных инструментом, заточенным с применением ультразвуковых колебаний.....	142
Бойцов А.Г., Курицын Д.Н., Денисов Л.В. Оптимизация формы и технология изготовления сложнопрофильного инструмента для сварки трением с перемешиванием	146
Курицына В.В. Направленное поверхностно-пластическое деформирование в управлении формой неравножестких деталей	154
Малышев В.И., Мурашкин С.В., Даньшина Е.А. Износ правящего инструмента при ультразвуковой правке абразивных кругов.....	163
Мартынюк А.В. Локальное алмазное выглаживание тонкостенных нежестких деталей	167
Мулдашева Г.К., Злобина И.В., Петровский А.П., Бекренев Н.В. Теоретическое обоснование повышения продольной устойчивости концевой инструмента при ультразвуковой обработке отверстий малого диаметра	174
Сарсенгалиев А.М., Определение технической возможности восстановления работоспособности горелочных устройств путем ультразвуковой очистки каналов от загрязнений.....	180
Емжина Д.С. Обоснование технологии формирования и восстановления рабочей поверхности инструмента для ультразвуковой доводки отверстий малого диаметра методом электроискрового легирования..	187

<i>Агапов С.И., Федянова Н.А. Повышение точности мелко модульных зубчатых колес, нарезанных с применением ультразвуковых колебаний.</i>	194
<i>Папшев В.А., Бекренев Н.В., Лясников В.Н., Злобина И.В. Влияние режимов лазерной ИК-модификации на структуру и морфологию плазмонапыленных гидроксиапатитовых покрытий</i>	199
<i>Ростунцова И.А., Еров В.А. Внедрение высокоэффективных поверхностей нагрева при модернизации действующего оборудования ТЭС.....</i>	209
<i>Веткасов Н.И., Худобин Л.В., Сапунов В.В. Модификация связи абразивных инструментов для ускорения полимеризации полуфабрикатов при нагреве в сверхвысоко частотном поле</i>	216
<i>Мартынюк А.В. Влияние режимов и условий обработки методом ЛППД алмазным индентором на глубину упрочненного слоя и остаточные деформации тонкостенных деталей.....</i>	225
<i>Скрипаченко К.К., Кошуро В.А., Пичхидзе С.Я. Модификация поверхности фторполимеров</i>	231
<i>Фомина М.А., Фомин А.А., Пошивалова Е.Ю., Родионов И.В. Фазово-структурные характеристики и физико-механические свойства оксидных покрытий, полученных индукционно-термической обработкой титанового сплава BT16</i>	235

Научное издание

ИНЖИНИРИНГ ТЕХНО 2014

Сборник трудов

II Международной научно-практической конференции

30 июня-1 июля 2014 г.

Том 2

Под общей редакцией Бекренева Николая Валерьевича
Ответственный редактор Боровских Ульяна Валентиновна
Технический редактор Злобина Ирина Владимировна

Редактор: О.А. Панина
Компьютерная верстка: Е.А. Опанасюк

Подписано в печать 22.07.2014

Бум. офсет. Усл. печ. л. 14,4 (15,5)

Тираж 300 экз.

Формат 60×84 1/16

Уч.-изд. л. 14,2

Заказ 12

ООО «Издательский Дом «Райт-Экспо»

410031, Саратов, Волжская ул., 28

Отпечатано в ООО «ИД «Райт-Экспо»

410031, Саратов, Волжская ул., 28, тел. (8452) 90-24-90