

ВЕСТНИК

САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2020

№ 3 (86)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Сентябрь 2020 года

Главный редактор

д.т.н., профессор А.А. Игнатьев

Заместитель главного редактора

д.т.н., профессор Ю.Б. Томашевский

Ответственный секретарь

к.т.н., доцент В.О. Горбачев

Редакционная коллегия:

Д.т.н., проф. А.Н. Васин (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н. О.Н. Долинина (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. О.В. Захаров (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А.Е. Зверовщиков (ПГУ)

Д.т.н., проф. А.А. Львов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

К.т.н. А.А. Казинский (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А.В. Королев (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. В.А. Кушников (СНЦ РАН)

Д.т.н., проф. Т.Г. Насад (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. А.Ф. Резчиков (ИПУ РАН)

Д.т.н., проф. И.В. Родионов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.ф.-м.н., проф. М.Д. Старостенков (АлтГТУ)

Чл.-корр. РАО, д.т.н., проф. А.А. Сытник

(СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А.А. Фомин (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А. Аман (Германия)

Д.т.н., проф. Р. Крехел (Словакия)

Д.т.н., проф. В. Хардт (Германия)

Редактор Л.А. Скворцова

Компьютерная верстка Т.В. Семёновой

Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:

Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77

Телефон: 8 (845-2) 99-89-81

E-mail: vestnik@sstu.ru

Подписано в печать 26.09.2020 Дата выхода в свет 30.09.2020

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 11,0 Уч.-изд. л. 4,2

Тираж 500 экз. Заказ 70

Отпечатано в Издательстве СГТУ,

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Полная электронная версия журнала

размещена в системе РИНЦ

в открытом доступе на платформе

eLIBRARY.RU

Свидетельство о регистрации средства массовой информации *ПИ № ФС77-65155 от 28 марта 2016 г.*

Подписной индекс 18378

(каталог Газеты. Журналы на 1-е полугодие 2021 г.)

© Саратовский государственный
ISSN 1999-8341 технический университет, 2020

VESTNIK

**SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY**

2020

№ 3 (86)

Scientific Journal

Since 2003

Published quarterly

September 2020

Editor-in-chief

Professor A.A. Ignatiev

Editor-in-chief assistant

Professor Yu.B. Tomashevsky

Executive secretary

Associate Professor V.O. Gorbachev

Editorial board:

Dr. Sc., Professor A.N. Vasin (SSTU)

Dr. Sc. O.N. Dolinina (SSTU)

Dr. Sc., Professor O.V. Zakharov (SSTU)

Dr. Sc., Professor A.E. Zverovschikov (PSU)

Dr. Sc., Professor A.A. Lvov (SSTU)

Ph. D. A.A. Kazinski (SSTU)

Dr. Sc., Professor A.V. Korolev (SSTU)

Dr. Sc., Professor V.A. Kushnikov (Scientific centre of RAS)

Dr. Sc., Professor T.G. Nasad (SSTU)

Corresponding member of RAS, Dr. Sc., Professor

A.F. Rezhnikov (ISP RAS)

Dr. Sc., Professor I.V. Rodionov (SSTU)

Dr. Sc., Professor M.D. Starostenkov (AltSTU)

Corresponding member of RAE, Dr. Sc., Professor

A.A. Sytnik (SSTU)

Dr. Sc., Professor A.A. Fomin (SSTU)

Dr. Sc., Professor A. Aman (Germany)

Dr. Sc., Professor R. Krekhel (Slovakia)

Dr. Sc., Professor V. Hardt (Germany)

Editor L.A. Skvortsova

Computer-based page-proof T.V. Semenova

Rendering A.H. Askarova

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054 Russia

Phone: +7 (845-2) 99-89-81

E-mail: vestnik@sstu.ru

Print date: 26.09.2020. Date of publication 30.09.2020

Format 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 11,0

Publication base sheet 4,2

Circulation: 500 printed copies

Order 70

Publisher and Editorial Address:

77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

eLIBRARY.ru

Subscription index **18378**

© Yuri Gagarin State Technical
ISSN 1999-8341 University of Saratov, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Кузнецов А.О.**
ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ СЛУЧАЙНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ 6
- Овчинникова Н.В.**
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБ УПРОЧНЕНИИ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ..... 14
- Пономарев А.И., Игнатъев А.А.**
КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 19
- Чекалин А.А., Решетников М.К.**
ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕТЕРОГЕННЫХ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ СПЛАЙНОВ 25
- Черненко А.В.**
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРУГЛОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ СО СЛОЕМ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ..... 34

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Денисов А.С., Галиев Р.К., Кулаков А.Т.**
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЗОТИРОВАННЫХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ 41
- Кузнецов В.А., Королев А.В.**
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ 47
- Перегородов А.А.**
ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ 57
- Финогеев Д.Ю., Решетникова О.П.**
АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ ТОЧНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ 63

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Мельникова И.П., Сёмина Т.Ю., Андреева О.А., Фомин А.А.**
НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АНТИЭМИССИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КАТОДНО-СЕТОЧНЫХ УЗЛОВ 72
- Охлупин Д.Н., Королев А.В., Синев И.В., Авдонин К.А.**
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ PVD..... 78

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, ENGINEERING AND MANAGEMENT

| | |
|--|----|
| Kuznetsov A.O. INVESTIGATING FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MECHANICAL SYSTEMS BY THE RANDOM EFFECTS METHOD | 6 |
| Ovchinnikova N.V. INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY ACTIONS ON STRENGTHENING HETEROGENEOUS MEDIA | 14 |
| Ponomarev A.I., Ignatiev A.A. MONITORING TOOL CONDITIONS IN TURNING OPERATIONS BASED ON FLUCTUATION ANALYSIS OF DYNAMIC SYSTEMS | 19 |
| Chekalin A.A., Reshetnikov M.K. GEOMETRIC OPTIMIZATION OF THE SURFACE MODELS USING HETEROGENEOUS SPLINE INTERPOLATIONS | 25 |
| Chernenko A.V. A MATHEMATICAL MODEL TO STUDY INTERACTION OF A CIRCULAR MULTILAYER PLATE WITH A VISCOUS LIQUID LAYER | 34 |

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

| | |
|---|----|
| Denisov A.S., Galiev R.K., Kulakov A.T. PERFORMANCE ANALYSIS OF NITRIDED CRANKSHAFTS | 41 |
| Kuznetsov V.A., Korolev A.V. THERMODYNAMIC METHODS FOR RESIDUAL STRESS RELAXATION IN METALS | 47 |
| Peregorodov A.A. SPECIFICS OF POLYMERIC MATERIALS APPLIED IN NON-METALLIC ROLLER BEARINGS | 57 |
| Finogeev D.Yu., Reshetnikova O.P. ADDITIVE TECHNOLOGIES IN MODERN PRODUCTION OF PRECISION MACHINE BUILDING PARTS | 63 |

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

| | |
|---|----|
| Melnikova I.P., Semina T.Yu., Andreeva O.A., Fomin A.A. ADVANCED ANTI-EMISSION MATERIALS FOR CATHODE-GRID NODES | 72 |
| Okhlupin D.N., Korolev A.V., Sinev I.V., Avdonin K.A. USING PVD COATING METHODS FOR THE COMPONENT PARTS | 78 |

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ, ВЕТЕРАНЫ, СТУДЕНТЫ – ПОЛИТЕХОВЦЫ!



Примите самые искренние поздравления по случаю 90-летия нашего технического университета, заслуженно носящего имя первого космонавта планеты – Юрия Гагарина!

За этой впечатляющей датой – достойный путь, насыщенный яркими событиями и достижениями.

За эти годы вуз подготовил тысячи высококвалифицированных специалистов для реального сектора экономики, внес достойный вклад в формирование кадрового и научного потенциала страны.

Благодаря целеустремленности, сплоченности, огромной созидательной энергии, творческому поиску, высокому профессионализму, умению бережно хранить традиции наш коллектив добивается успехов в осуществлении самых смелых планов и идей.

Широкая практическая, инновационная направленность, современные технологии, новаторские проекты, которые реализует СГТУ, позволяют нам уверенно идти в ногу со временем.

Благодарю вас за плодотворную совместную работу, за понимание высокой миссии Политеха.

Желаю коллективу здоровья, энтузиазма, вдохновения, благополучия и процветания!

Ректор СГТУ имени Гагарина Ю.А.

О.А. Афонин

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.311.25

А.О. Кузнецов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ СЛУЧАЙНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

***Аннотация.** Целью настоящей работы является попытка изложить теорию и технологию мгновенного частотного анализа методом случайного воздействия в широком диапазоне частот. Хотя изложение ведется применительно к механическим системам, все теоретические принципы и положения универсальны, вследствие чего применимы для исследования электрических, акустических и прочих колебательных систем.*

***Ключевые слова:** частотный анализ, АЧХ, ряд Фурье, белый шум, случайное воздействие, гармонический осциллятор*

A.O. Kuznetsov

INVESTIGATING FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MECHANICAL SYSTEMS BY THE RANDOM EFFECTS METHOD

***Abstract.** The purpose of this paper is to present the theory and technology of the instantaneous frequency analysis using the random effects methodology across a wide range of frequencies. Though the presentation refers the mechanical systems, all the theoretical principles and provisions are universal, and therefore, are applicable for the study of electrical, acoustic and other oscillatory systems.*

***Keywords:** frequency analysis, frequency response, Fourier series, white noise, random effects, harmonic oscillator*

Центральными вопросами в развитии современного приборостроения в настоящее время являются: технический уровень, качество, надежность и долговечность разрабатываемых приборов. Качество, надежность и долговечность прибора следует рассматривать как следствие оптимального конструктивного решения, технологического обеспечения заданных конструктором характеристик в процессе производства прибора и сохранения этих характе-

ристик службой эксплуатации в течение запроектированного ресурса. Вполне очевидно, что три стороны, определяющие уровень качества, надежность и долговечность прибора, в свою очередь, определяются техническим уровнем [1].

При современных требованиях к точности и надежности требуется постоянное совершенствование не только технологии производства, но и методов проверки параметров изделий, наиболее приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Так, например, острой проблемой качества и надежности работы приборов является влияние автоколебаний и вибраций. При серийном производстве приборов инерционного принципа действия, например таких, как акселерометры и виброметры, с целью контроля качества производится частотный анализ полосы пропускания измеряемых ускорений, который в настоящее время проводят посредством перебора частот с определенным шагом, что занимает много времени и энергетических ресурсов, и самое главное – затрачивается ресурс работы прибора. При этом обеспечение высокой разрешающей способности на всем диапазоне частот также ограничивается временным ресурсом.

Предлагаемый в настоящей работе метод позволяет производить мгновенный частотный анализ посредством возбуждения колебаний чувствительного элемента при помощи модели некоррелированного белого шума. Особенностью данного метода является то, что выходной сигнал, разложенный в ряд Фурье, по сути, отражает амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) исследуемого прибора.

Из теории колебаний известно, что отклик динамической системы на гармоническое воздействие есть все тот же гармонический сигнал, с той же частотой, но отличной амплитудой и фазой. По сути, задача исследования частотных характеристик динамической системы сводится к экспериментальному нахождению этих двух зависимостей.

Рассмотрим в качестве примера осциллятор с малым затуханием, характеризующий механическую систему, имеющую одну степень свободы. Механическая система, кинематическое изображение которой приведено на рис. 1, состоит из груза массы m , закрепленного на упругом элементе – пружине имеющей коэффициент жесткости k . Механическая система также содержит демпфер с коэффициентом демпфирования n .

Как известно, такая механическая система представляет собой затухающий или диссипативный осциллятор, построенный на основе консервативного гармонического осциллятора, и описывается дифференциальным уравнением второго порядка [2]:

$$m\ddot{x} + n\dot{x} + kx = F(t), \quad (1)$$

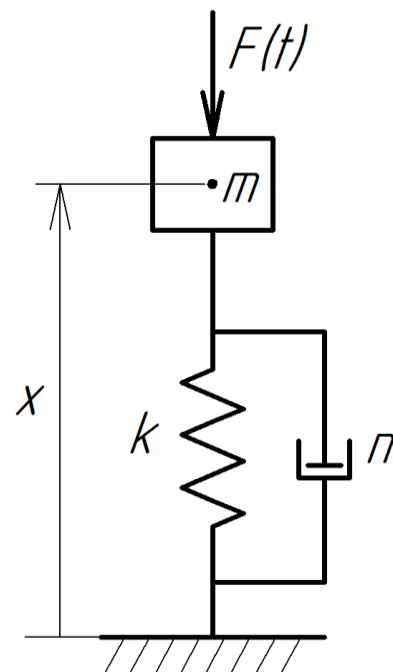


Рис. 1. Колебательная механическая система с одной степенью свободы

где $F(t)$ – внешнее воздействие.

Собственная частота простейшего гармонического осциллятора, которым является рассматриваемая механическая система, определяется из соотношения

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

Пример расчета. Исходные данные механической системы для численного расчета и моделирования:

- масса: $m = 1$ [кг];
- коэффициент затухания: $n = 1$ [кг/с];
- коэффициент жесткости: $k = 10^3$ [Н/м].

Используя соотношение (2), определим значение собственной частоты гармонического осциллятора:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^3}{1}} = 5.0329[\text{Гц}].$$

Как видно, собственная частота колебаний механической системы, приведенной на рис. 1, составляет 5,032 Гц.

Для того чтобы провести численное моделирование при помощи компьютерной математической модели, необходимо получить передаточную функцию механической системы, описываемой уравнением (1). Для этого обозначим преобразование Лапласа произвольной функции $f(t)$ через $\hat{f}(s) = \mathcal{L}\{f(t)\}$. Применим преобразование Лапласа к обеим частям уравнения [3]:

$$ms^2 x(s) + nsx(s) + kx(s) = F(s). \quad (3)$$

Передаточная функция замкнутой системы записывается в виде отношения выходного сигнала механической системы к входному воздействию:

$$W(s) = \frac{x(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + ns + k}. \quad (4)$$

Искомые АЧХ и фазочастотная характеристика (ФЧХ) получаются заменой $s \rightarrow j\omega$ и взятием модуля и аргумента полученной передаточной функции $W(j\omega)$ соответственно:

$$\begin{aligned} \alpha(\omega) &= |W(j\omega)| \\ \varphi(\omega) &= \arg[W(j\omega)] \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $a(\omega)$ – амплитуда; $\varphi(\omega)$ – фаза; $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, где f – частота.

Подставляя значение циклической частоты в соотношение (5), получаем численное значение амплитуды и фазы на заданной частоте ω . Таким образом, производя перебор частот с определенным шагом, нетрудно получить АЧХ и ФЧХ исследуемой механической системы. На практике такой подход осложнен влиянием переходных процессов,

обусловленных различными факторами, в результате чего после подачи входного сигнала с частотой ω перед измерением амплитуды выходного сигнала требуется дополнительное время до получения установившегося значения амплитуды.

На рис. 2 представлен результат частотного анализа передаточной функции (4) при помощи функции *Bode* программного комплекса *Matlab* [4]. В этом случае точность определения резонансной частоты зависит от шага задаваемой частоты f .

Из результатов проведенного частотного анализа видно, что собственная частота механической системы равна 5.03 Гц, что совпадает с расчетным значением, полученным по формуле (2).

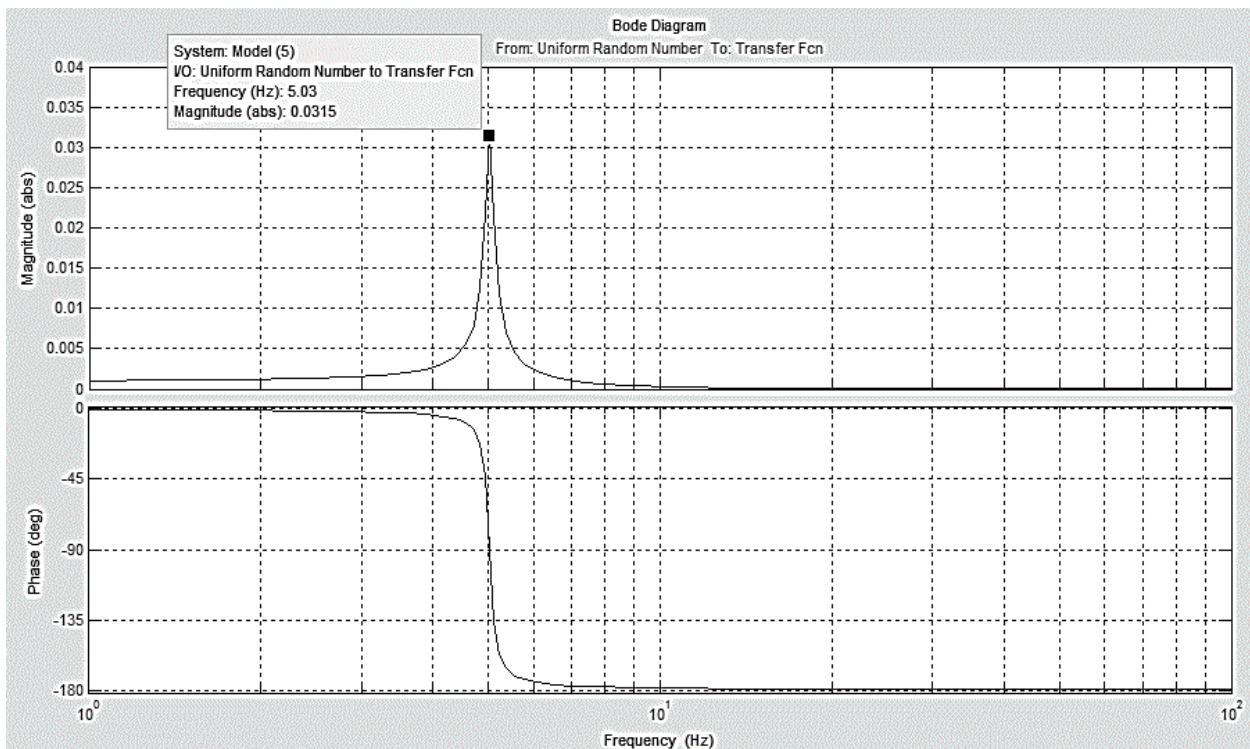


Рис. 2. Результаты частотного анализа, полученные при помощи функции *Bode*

Из теории колебаний известно, что если осциллятор испытывает гармоническое внешнее воздействие с частотой ω , то в нем возбуждаются гармонические вынужденные колебания с той же частотой. Амплитуда этих колебаний тем больше, чем ω ближе к частоте собственных колебаний осциллятора [5]. Такая «избирательность» колебательной системы по отношению к частоте проявляется с уменьшением коэффициента затухания – диссипативного сопротивления среды (трения).

Теперь допустим, что гармоническое внешнее воздействие прилагается к системе осцилляторов, имеющих малое затухание и обладающих различными собственными частотами. В таком случае на это воздействие «отзовется» наиболее сильно именно тот осциллятор, собственная частота которого равна или близка к частоте внешнего воздействия; схожим образом работает слуховой аппарат животных, предназначенный для восприятия звуковых колебаний [6]. Таким образом, если на систему осцилляторов воздействует смесь гармоник, описываемая функцией (6), то на такое воздействие «отзовется»

исключительно те осцилляторы, собственная частота которых близка или совпадает с какой-либо из внешних частот ω_k :

$$f(t) = \sum_k a_k e^{i\omega_k t}, \quad (6)$$

где a_k – амплитуда k -й гармоники; $e^{i\omega_k t}$ – функция суммы гармоник.

Набор рассматриваемых частот ω_k в этом случае называется спектром функции $f(t)$, для данного случая дискретный спектр. Однако если взять интеграл по всем частотам, при бесконечно малом шаге интегрирования $d\omega$ получаем непрерывный спектр, имеющий следующий вид:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (7)$$

где F – спектральная плотность. Такой спектр может занимать всю ось ω , однако вне этого интервала функция $F(\omega)$ равна нулю. Имея достаточное количество осцилляторов со всевозможными значениями частоты ω_k , можно определить весь ход функции $F(\omega)$.

На практике примером такой функции может служить стационарный белый шум, характеризующийся равномерным распределением спектральных составляющих по всему диапазону частот. Такой шум можно описывать вектором случайных чисел как последовательность отсчетов белого шума при условии, что его среднее значение амплитуды равно нулю, а автокорреляционная матрица представляет собой диагональную матрицу с дисперсиями по главной диагонали:

$$R_w = E[ww^T] = \sigma^2 I. \quad (8)$$

Таким образом, автокорреляционная матрица R_w представляет собой диагональную матрицу I с дисперсиями по главной диагонали [7].

Используя функцию генератора случайных чисел *Random number* (рис. 3) программного комплекса *Matlab* [4], синтезируем такой шум.

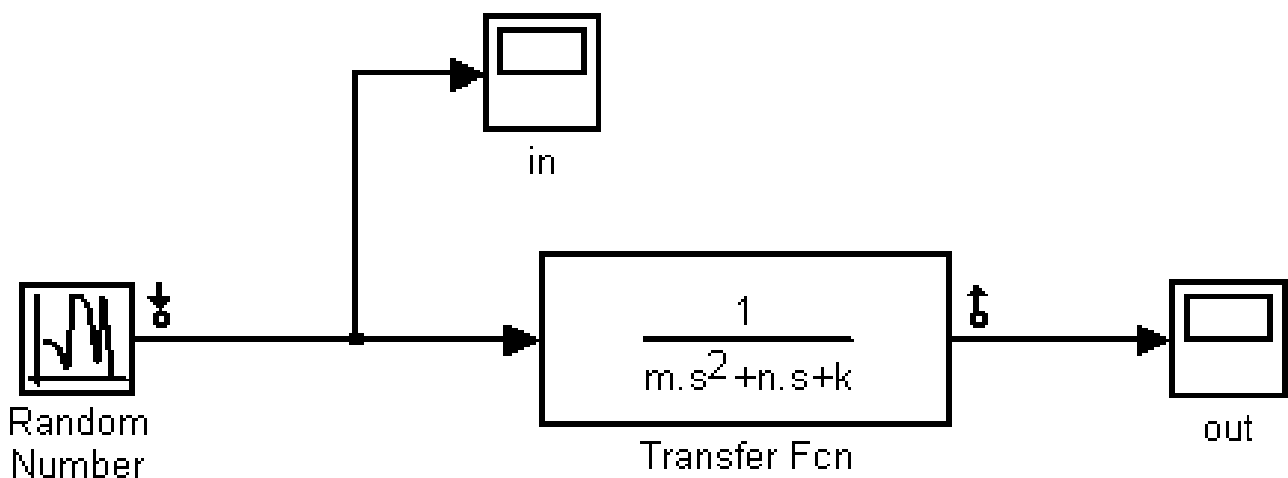


Рис. 3. Структурная схема исследуемой механической системы (*Matlab*)

Как видно из фрагмента сигнала, представленного на рис. 4, сигнал, используемый в качестве входного воздействия, представляет собой не что иное как шум, при разложении которого в ряд Фурье хорошо видно, что его спектральные составляющие равномерно распределены на всем частотном диапазоне, что характерно исключительно для белого шума (рис. 6).

На рис. 5 представлен фрагмент выходного сигнала; как видно, основная частота колебаний соответствует собственной частоте исследуемой механической системы [8]. При разложении сигнала, представленного на рис. 5, в ряд Фурье получаем АЧХ исследуемой механической системы, представленную на рис. 7, так как входное воздействие происходит одновременно на всех частотах, и имеет одинаковую, равномерную амплитуду, что подтверждает спектральная характеристика, приведенная на рис. 6.

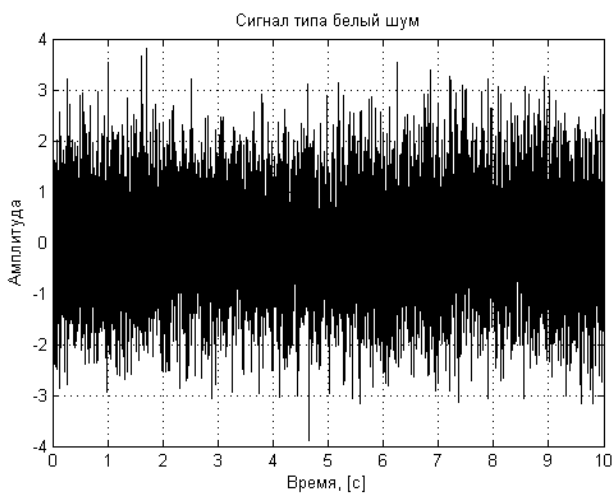


Рис. 4. Входное воздействие – белый шум

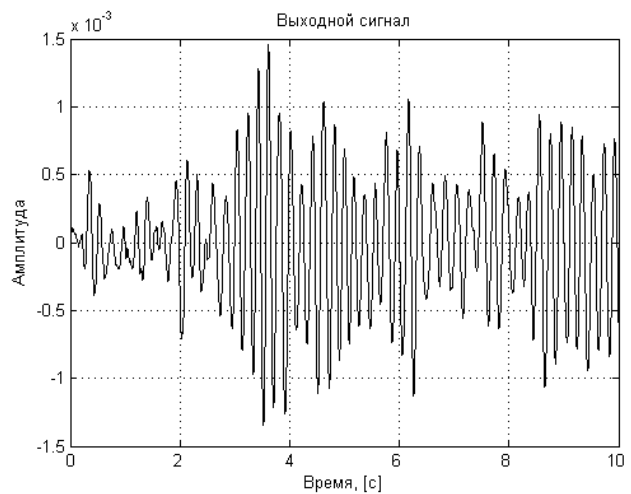


Рис. 5. Выходной сигнал

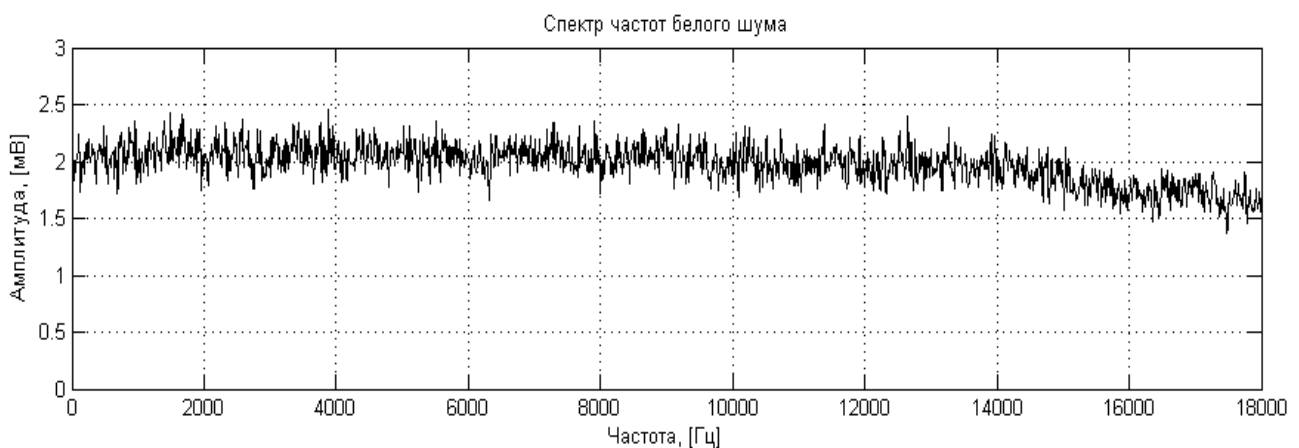


Рис. 6. Спектральная характеристика синтезированного белого шума

Из спектральной характеристики выходного сигнала механической системы, представленной на рис. 7, видно, что резонансная частота составляет 5,035 Гц и совпадает с результатами, полученными при помощи функции *Bode* (рис. 2) и формуле (2). Также при использовании белого шума обеспечивается более высокая разрешающая способность, что повышает точность определения резонансного пика АЧХ.

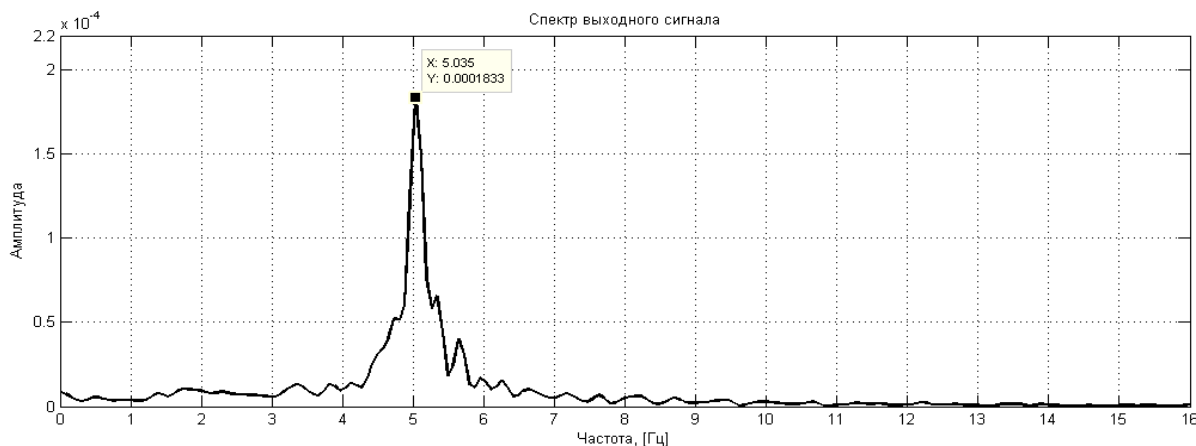


Рис. 7. Спектральная характеристика выходного сигнала

В реальных условиях проверка методом белого шума заняла не более нескольких секунд, в то время как метод перебора частот при той же разрешающей способности потребовал бы нескольких часов; при серийном производстве приборов эта разница весьма существенна.

Проверка производится на всем диапазоне частот одновременно, следовательно, условия проверки наиболее сильно приближены к реальным условиям, при этом происходит выявление всех собственных частот и полос пропускания как механической системы, так и измерительного канала.

Таким образом, проведено теоретическое обоснование и показано практическое применение предложенного метода при исследованиях частотных характеристик механической системы с помощью модели некоррелированного белого шума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия.
2. Курс теоретической механики: учеб. для вузов / В.И. Дронг, В.В. Дубинин, М.М. Ильин и др.; под ред. К.С. Колесникова. 4-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 758 с.
3. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления: учеб. пособие. СПб.: Профессия, 2007.
4. Ласица А.М. Использование Matlab и GNU Octave в вычислительной физике: конспект лекций. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. 44 с.
5. Зельдович Б., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики. 3-е изд., перераб и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972. 592 с.

6. Стратиева О.В. Клиническая анатомия уха: учеб. пособие. СПб.: СпецЛит, 2004. 271 с.

7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1991. 274 с.

8. Злобина И.В., Бекренев Н.В. Исследование влияния ультразвуковой пропитки на физико-механические характеристики армированных углеродными волокнами полимерных композиционных материалов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 2. С. 72-78.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Кузнецов Артем Олегович –
ассистент кафедры «Приборостроение»
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Artem O. Kuznetsov –
assistant Lecturer, Department
of Instrumentation, Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.07.20, принята к опубликованию 17.08.20

Н.В. Овчинникова

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ
ОБ УПРОЧНЕНИИ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

Аннотация. Сформулирована задача об упрочнении неоднородной среды высокочастотным воздействием. Представлены уравнения соответствующей контактной задачи для исследования напряженно-деформированного состояния континуума «индентор – неоднородная упругопластическая среда» с учетом искривления поверхности контакта в процессе деформирования.

Ключевые слова: контактная задача, упрочнение, неоднородная среда, напряженное состояние

N.V. Ovchinnikova

**INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY ACTIONS
ON STRENGTHENING HETEROGENEOUS MEDIA**

Abstract. The article considers the challenges related with strengthening heterogeneous media under the influence of high-frequency actions. The presented equations to the corresponding contact problem have been used in the strain-stress analysis of the continuum «indenter – heterogeneous elastoplastic medium» with account for the curvature of deformed surfaces.

Keywords: contact problem, strengthening, heterogeneous medium, deflected mode

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно осваиваются различные нетрадиционные подходы к повышению эксплуатационных характеристик деталей машин и механизмов. Одним из них является технологическая обработка поверхности детали с помощью высокочастотного воздействия. Применение высокочастотного воздействия позволяет существенно повысить качество обрабатываемой поверхности и за счет поверхностного упрочнения материала обеспечить высокую износоустойчивость деталей. Для оптимизации технологических параметров механической обработки материалов с использованием высокочастотного воздействия и повышения эффективности обработки весьма актуальным представляется исследование напряженно-деформированного состояния в элементах и узлах машин и механизмов при комбинированном силовом и высокочастотном воздействии.

За основу рассматриваемой проблемы принят процесс упрочнения неоднородных композиционных материалов за счет динамического силового воздействия на их поверхность жесткого

индентора в виде продолговатого цилиндрического тела со сферической рабочей поверхностью. Его прообразом служит широко применяемый в машиностроении для поверхностного упрочнения металлов технологический инструмент, называемый «алмазным карандашом».

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Как правило, размеры зоны контактного взаимодействия в процессах поверхностной обработки значительно меньше размеров обрабатываемой детали в плане, в связи с чем исследуемый объект может быть представлен в виде континуума, включающего описанный выше упругий жесткий индентор и неоднородную упругопластическую среду, размеры и форма которой с точки зрения изучаемого процесса в первом приближении не имеют особого значения.

В общем случае силовое воздействие рабочего органа на обрабатываемый материал будем моделировать путем приложения к нему направленного вдоль общей оси симметрии индентора и среды комбинированного усилия с постоянно действующей и переменной составляющими:

$$F(t) = F_0 + F_V \sin \omega t, \quad (1)$$

где F_0 , и F_V – соответственно постоянная и переменная составляющие усилия, и амплитуда переменной составляющей, колеблющейся с ультразвуковой частотой ω , t – время. Наличие здесь постоянной составляющей усилия обусловлено необходимостью обеспечения в реальном технологическом процессе гарантированного натяга между рабочим инструментом и обрабатываемой поверхностью и предотвращения тем самым его отрыва от нее в процессе обработки.

Выделим в обрабатываемой среде некоторый объем в виде правильного кругового цилиндра, к центру одной из торцевых поверхностей которого прикладывается технологический инструмент в виде жесткого упругого индентора со сферической рабочей поверхностью. Конечная область в объеме среды выделяется для удобства формулирования граничных условий, ее размеры радиус и толщина произвольны, ничем не ограничены и могут принимать любые значения. По физическому смыслу рассматриваемой задачи зона силового воздействия локальна, вследствие чего область возмущения в среде ограничена. Поэтому выделенный в среде объем всегда может быть выбран таким, что наличие его границ не будет оказывать влияния на процесс деформирования в области контакта и ее окрестностях. Вместе с тем при обработке объектов малых размеров соизмеримых с областью возмущения влияние границ может быть учтено.

Исследование напряженно-деформированного состояния будем проводить в предположении, что как упругие, так и пластические деформации материалов среды и индентора являются малыми. При условии, что индентор по условиям своего закрепления может совершать только возвратно поступательное движение вдоль оси симметрии, задача об исследовании напряженного и деформированного состояния континуума будет осесимметричной.

Отнесем цилиндр и индентор к цилиндрической системе координат $O r \theta z$, расположив ее начало в центральной точке контактной поверхности и направив ось z вдоль общей оси симметрии индентора и цилиндра (рис. 1).

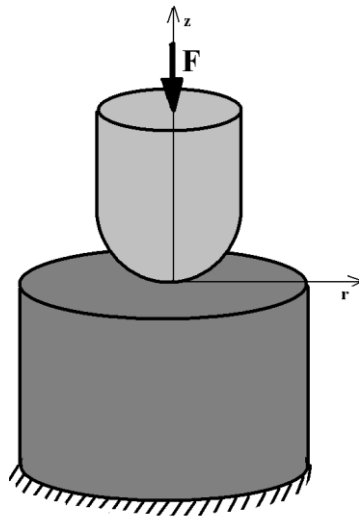


Рис. 1. Схема процесса упрочнения цилиндра

При принятых допущениях в геометрически линейной постановке в материале среды должны выполняться следующие группы уравнений [1, 2]:

1) уравнения движения

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} = \rho \frac{d^2 u_r}{dt^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (r \sigma_{zr}) = \rho \frac{d^2 u_z}{dt^2},$$

2) соотношения Коши

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right), \quad (3)$$

3) физические уравнения материала неоднородной среды, которые могут быть заданы как аналитически, так и таблично:

$$\varepsilon_{ij} = \Phi(\sigma_{ij}) \quad (i, j = r, \theta, z), \quad (4)$$

Для материала индентора уравнения движения (2) и соотношения Коши (3) имеют тот же вид, а компоненты тензора напряжений и тензора деформаций связаны между собой законом Гука:

$$\varepsilon_{ij}^{el} = \frac{1+\nu}{E} \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{3\nu}{1+\nu} \sigma_{cp} \right) \quad (i, j = r, \theta, z). \quad (5)$$

В соотношениях (2) – (5) приняты следующие обозначения:

σ_{ij} ($i, j = r, \theta, z$) – компоненты тензора напряжений; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций; $u_i = u_i(r, z, t)$ – компоненты вектора перемещений; E, ν и ρ – модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность материала среды или индентора.

Записанные выше уравнения следует дополнить соответствующими граничными и контактными условиями.

Нижняя поверхность объема ограничивающего среду жестко закреплена. Поэтому во всех ее точках осевое смещение в направлении оси Oz должно быть равно нулю, то есть

$$u_z = 0. \quad (6)$$

Учитывая, что боковые поверхности индентора и среды свободны от внешней нагрузки, граничные условия на них зададим так:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{r\theta} = \sigma_{zz} = 0. \quad (7)$$

Полагая, что сосредоточенное усилие $F(t)$ прикладывается к верхней поверхности индентора в виде распределенной нагрузки, граничное условие на ней запишем в виде

$$\sigma_{zz} = -p(t), \sigma_{rz} = 0, \quad (8)$$

где $p(t)$ – равномерно распределенная нагрузка по верхней торцевой поверхности индентора, эквивалентная приложенной к нему сосредоточенной силе:

$$F(t) = 2\pi \int_0^R p(t)rdr, \quad (9)$$

где R – радиус торцевой поверхности индентора.

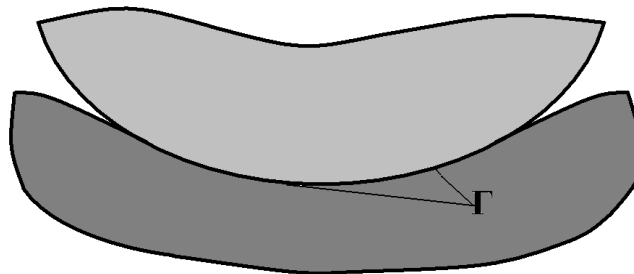


Рис. 2. Искривленная поверхность контакта

Обозначим через σ_{nn}^l и $\sigma_{n\tau}^l$ ($l = I, II$, где I – индентор, II – неоднородная среда) нормальные и касательные компоненты вектора напряжений на площадках перпендикулярных внешним нормальям деформированных поверхностей индентора и среды в области контакта и ее окрестностях. Тогда граничные условия на участках поверхностей, свободных от внешней нагрузки, могут быть сформулированы в виде

$$\sigma_{nn}^l = \sigma_{n\tau}^l = 0, \quad (10)$$

а кинетические условия на поверхности контакта Γ (рис. 2) с учетом отсутствия на ней сил трения:

$$\sigma_{nn}^I = \sigma_{nn}^{II}, \quad (11)$$

$$\sigma_{n\tau}^I = \sigma_{n\tau}^{II} = 0. \quad (12)$$

Кроме кинетических условий (11) и (12), на поверхности контакта должны выполняться еще и кинематические граничные условия, а именно

$$u_n^I + u_n^{II} - \delta \leq 0, \quad (13)$$

где δ – начальный зазор между точками возможного контакта, а u_n^l ($l = I, II$) – нормальные составляющие их векторов перемещений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение поставленной задачи сводится к интегрированию дифференциальных уравнений движения континуума при соблюдении физических уравнений, соотношений Коши, граничных условий и условий в области контакта. Очевидно, что в силу математических трудностей получить ее аналитическое решение в приведенной выше постановке затруднительно. Поэтому возникает необходимость разработки подходов, позволяющих упростить решение поставленной задачи и вместе с тем получить на их основе результаты, пригодные для практики. Один из таких подходов состоит в замене исходной задачи в классической постановке ее вариационным аналогом с последующим применением для решения последней численным методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинникова Н.В., Павлов Д.Г., Чеботаревский Ю.В. Модельная задача для исследования процессов поверхностного упрочнения пластическим деформированием с применением ультразвуковых воздействий // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. № 4 (28). С. 14-18.

2. Овчинникова Н.В., Чеботаревский Ю.В. К расчету напряженно-деформированного состояния упругопластического полупространства, контактирующего с абсолютно жестким индентором // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. № 4 (51). С. 10-17.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Овчинникова Наталья Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Natalya V. Ovchinikova – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.02.20, принята к опубликованию 17.08.20

А.И. Пономарев, А.А. Игнатьев

**КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА
ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ
ПОКАЗАТЕЛЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОСТИ
ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Аннотация. Рассматриваются вопросы контроля износа резца при токарной обработке по характеристикам виброакустических колебаний и оценки начала критического износа по показателю колебательности.

Ключевые слова: токарная обработка, износ резца, вибрации, показатель колебательности

A.I. Ponomarev, A.A. Ignatiev

**MONITORING TOOL CONDITIONS IN
TURNING OPERATIONS BASED ON FLUCTUATION
ANALYSIS OF DYNAMIC SYSTEMS**

Abstract. The issues of cutting tool wear control during turning operations based on vibroacoustic characteristics, and assessment of critical tool wear at its initial stage by the vibration index are considered.

Keywords: turning, cutter wear, vibrations, vibration index

ВВЕДЕНИЕ

За минувшие три десятка лет в процессах обработки резанием на автоматизированных металлорежущих станках (АМС) произошли большие перемены, связанные с применением новых инструментальных материалов и повышенных режимов обработки. Износ инструмента является одним из доминирующих факторов, влияющих на параметрическую надежность АМС.

Контроль износа резца при токарной обработке необходим, во-первых, для своевременного ввода коррекции, так, чтобы размеры деталей поддерживались в поле допуска, во-вторых, для оперативной замены резца при точении, так как в противном случае резко снижается качество обработанной поверхности. Кроме того, экономические потери из-за износа инструмента возникают в результате неоптимального использования сменных пластин, так как часто в производственных условиях они заменяются задолго до того, как наступают ста-

дия критического износа, то есть не полностью используется ресурс дорогостоящего инструмента. Вопросы контроля инструмента на АМС рассматривались как отечественными, так и зарубежными учеными [1-5].

В производственных условиях используются несколько методов, которые показали достаточную точность и надежность. Тем не менее определенный научный и практический интерес представляет метод контроля инструмента, основанный регистрации виброакустических (ВА) колебаний динамической системы (ДС) станка с последующей их обработкой методами теории автоматического управления и вычислении показателя колебательности динамической системы [6].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Вибрационные методы находят свое применение в качестве неразрушающих методов контроля, во-первых, работоспособности АМС, во-вторых, состояния режущего инструмента.

В этих случаях используется анализ ВА колебаний ДС как во временной, так и в частотной областях, что позволяет выявить их изменение, которое может свидетельствовать о наличии какого-либо дефекта или повреждения станка, износа или разрушения инструмента. Мониторинг состояния инструмента помогает оперативно оценивать его износ, а также осуществлять сбор статистических данных для последующей оценки надежности и качества инструмента [7, 8].

В качестве измерительных преобразователей для контроля состояния инструмента опробовано множество датчиков, а именно: механические щупы, датчики мощности, датчики акустической эмиссии, датчики вибрации, датчики крутящего момента, датчики силы и ряд других [1, 4]. Датчики и преобразование их сигналов играют важную роль во всех процессах автоматизированного контроля. Обработка и анализ сигналов важны, так как это определяет повышение надежности АМС, уменьшение времени простоя и повышение качества обработанных деталей.

Эксплуатационные неисправности инструмента подразделяются на две основные группы: первая – постепенный износ под воздействием потери обрабатываемого материала в результате резания и трения, что через определенное время вызывает поломку инструмента; вторая – преждевременный износ режущей кромки в результате образования сколов, которые возникают непредвиденно в результате неправильных значений параметров обработки или дефекта материала режущего инструмента или обоих этих факторов [4, 9]. В случае если срок службы инструмента приближается к своему концу, это может сказаться на качестве обрабатываемой поверхности заготовки. Характеристики поверхности заготовки напрямую зависят от взаимодействия с инструментом, которое определяется геометрией инструмента, материалом инструмента и заготовки, условиями резания и параметрами обработки (скорость резания, подача, глубина резания).

Метод оценки износа инструмента с использованием показателя колебательности динамической системы заключается в следующем.

Пьезоэлектрические преобразователи вибрации (датчики) устанавливаются на основные компоненты токарного станка, наиболее связанные с резанием (резцовый блок). Путем

обработки записей вибраций вычисляется автокорреляционная функция (АКФ) и выполняется ее аппроксимация формулой

$$K(\tau) = A \cdot e^{-a\tau} (1 + m \cdot \cos \Omega \tau) \cdot \cos \omega_0 \tau, \quad (1)$$

где A – постоянный коэффициент, a – коэффициент затухания, Ω – частота огибающей АКФ, ω_0 – основная частота колебаний АКФ, m – коэффициент модуляции.

Следующим этапом является определение передаточной функции ДС по формуле, полученной А.Н. Складчиковым [10]. В ней установлена связь изображения по Лапласу АКФ с передаточной функцией системы; тогда с учетом формулы (1) путем алгебраических преобразований выводится выражение для передаточной функции ДС, замкнутой процессом резания:

$$W_3(p) = \frac{A(1+m)\sqrt{2}[(p+a)^2 + \omega_0^2]}{[(p+a)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2][(p+a)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2]}. \quad (2)$$

Из передаточной функции (2) формируется частотная функция $W_3(j\omega)$ путем замены $p = j\omega$, а далее из нее вычисляется амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$. Определив начальное и максимальное значения амплитудно-частотной характеристики, вычисляют показатель колебательности ДС [11]

$$M_{\max} = \frac{[A(\omega)]_{\max}}{A(0)}. \quad (3)$$

Все расчеты выполняются по специальной программе на компьютере.

Следует отметить, что показатель колебательности определяет запас устойчивости ДС. Значения показателя 1,1...1,5 соответствуют максимальному запасу устойчивости. Повышение уровня вибраций, обусловленное износом резца, приводит к повышению показателя колебательности, что снижает запас устойчивости ДС. Сравнивая значения показателя колебательности ДС для неизношенного резца (эталонное значение) с его значениями, полученными при последовательной обработке деталей, то есть в условиях износа резца, можно оценить степень его износа.

По результатам специальных измерений устанавливается граничное значение показателя колебательности, соответствующее критическому износу инструмента, и принимается решение о недопустимости дальнейшей обработки деталей данным инструментом в связи с резким снижением их качества.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперимент на токарном станке ТП-400 при обработке колец подшипников направлен на определение момента смены режущей пластины инструмента при наступлении начала ее критического износа. Для полного анализа необходимо проведение экспериментов при различных скоростях резания (определяется в основном частотой вращения заготовки), глубинах резания и подачах.

В данном случае параметры режима резания являются постоянными, и анализируется влияние износа режущей пластины. Вибрация в процессе резания регистрируется с помощью измерителя вибрации ВШВ-003М2 [12]. Диапазон измерения ВА колебаний – до 4 кГц. Измерение производится для получения серии данных, отражающих процесс резания, которые

сохраняются в формате WAVE-файла на компьютере типа Notebook. Измерения вибрации выполнялись при постоянных значениях режима резания: скорость вращения заготовки 300 об/мин, снимаемый припуск 0,2 мм, подача 0,5 мм/мин.

До эксперимента смена режущих пластин в условиях производства выполнялась через каждые 35 обработанных деталей. Практический интерес представляет определение реальной периодичности замены режущей пластины, оцениваемой, во-первых, по повышению волнистости обработанной поверхности выше допустимой, во-вторых, по снижению запаса устойчивости ДС, так как именно этот показатель характеризует ее качество. Сопоставительные результаты измерений показателя колебательности и волнистости обработанной поверхности приведены в таблице. Допустимое значение волнистости дорожки качения кольца составляет 10 мкм.

Результаты измерений показателя колебательности
и качества обработанной поверхности

| Номер обработанной детали | Показатель колебательности | Фактическое значение волнистости, мкм |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 3,10 | 7,2 |
| 2 | 3,12 | 7,2 |
| 3 | 3,08 | 7,3 |
| 5 | 3,15 | 7,1 |
| 10 | 3,22 | 7,4 |
| 15 | 3,27 | 7,7 |
| 20 | 3,40 | 7,9 |
| 25 | 3,46 | 8,3 |
| 30 | 3,57 | 8,1 |
| 35 | 3,65 | 8,5 |
| 37 | 3,80 | 8,8 |
| 39 | 3,88 | 8,7 |
| 41 | 3,98 | 9,0 |
| 43 | 4,09 | 9,4 |
| 45 | 4,53 | 9,8 |
| 46 | 5,17 | 9,9 |
| 47 | 5,79 | 10,4 |
| 48 | 6,85 | 10,9 |

Анализ полученных результатов показывает, что выявлена тенденция повышения волнистости дорожки качения и, соответственно, снижение запаса устойчивости ДС, начиная с детали, обработанной 45-й по счету. Это свидетельствует о том, в данном случае режущие способности инструмента используются не в полной мере.

Изложенное выше показывает, что критерием в принятии решения по выбору режима обработки и момента замены инструмента может служить показатель колебательности ДС. Собирая данные на различных АМС и анализируя их, можно не только наблюдать процесс износа инструмента, но и определить, в какой момент времени наступает критический износ, по достаточно резкому возрастанию показателя колебательности.

Все эти данные при дополнительной обработке дают статистику о реальных характеристиках инструмента, его поведении в процессе обработки и, конечно, показывают преимущества и недостатки инструмента в процессе испытаний. Так можно установить пригодность режущего инструмента для конкретного производства, так как не всегда можно верить всем заявленным обещаниям поставщика инструмента о его характеристиках.

Известно, что различные инструменты, к примеру сменные пластины, в тех или иных условиях проявляют себя по-разному, что определяется динамическим качеством АМС при различных режимах резания, материалом заготовки, характеристиками СОТС и рядом других факторов.

В реальном производстве у работников нет времени и средств, чтобы перепробовать все возможные факторы. Статистика испытаний инструмента, собранная при применении показателя колебательности ДС, помогает определиться с выбором режима обработки не только на основе мнения операторов, но и при соответствующих измерениях по специальным методикам.

ВЫВОДЫ

Использование метода оценки износа режущего инструмента на основе определения показателя колебательности динамической системы АМС позволяет оценить рациональность смены режущих пластин во время выполнения токарной обработки. Смена инструмента происходила излишне рано: реальная потребность в смене инструмента для обеспечения заданных требований к качеству обработанной поверхности нужна на 9...10 деталей позже, нежели было рекомендовано в имеющемся технологическом процессе.

Определение износа режущего инструмента необходимо для снижения количества бракованных деталей из-за несвоевременной замены сменных пластин или перезаточки инструмента, а также из-за чрезмерного его расхода в случае ранней замены. Фактически на некоторых предприятиях смена инструмента осуществляется слишком рано, что приводит, во-первых, к перерасходу дорогостоящего инструмента, во-вторых, увеличивает время простоя токарного станка, связанного с его переналадкой. Использование метода оценки износа режущего инструмента на основе определения показателя колебательности динамической системы является достаточно объективным и позволяет учитывать реальные условия обработки на конкретном станке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартинов Г.М., Григорьев А.С. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки // СТИН. 2012. № 2. С. 23-28.
2. De Silva C.W. Vibration Monitoring, Testing, and Instrumentation // CRC Press. Taylor & Francis Group, 2007. 696 p.
3. Малыхин В.В., Яцун Я.И., Новиков С.Г. Виброакустическая диагностика состояния режущего инструмента и микронеровностей обрабатываемой поверхности // Инженерный журнал. 2014. № 4. С. 31-35.

4. Диагностика и надежность автоматизированных систем / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатьев, В.В. Мартынов, А.Г. Схиртладзе. Старый Оскол: ТНТ, 2006. 380 с.
5. Игнатьев А.А., Добряков В.А., Игнатьев С.А. Автоматизированный контроль в системе управления качеством изготовления деталей подшипников // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1(84). С. 14-25.
6. Игнатьев А.А., Коновалов В.В., Игнатьев С.А. Идентификация в динамике станков с использованием стохастических методов. Саратов: СГТУ, 2014. 96 с.
7. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Омск: Изд-во Омского гос. техн. ун-та, 2011. 360 с.
8. Игнатьев С.А., Казинский Н.А., Игнатьев А.А. Выявление катастрофического износа инструмента при мониторинге токарной обработки // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2017. С. 46-49.
9. Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин и др. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.
10. Складчиков А.Н. Операторные методы в статистической динамике автоматических систем. М.: Наука, 1965. 457 с.
11. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
12. Пономарев А.И., Игнатьев А.А. Контроль износа режущего инструмента при токарной обработке по вибрационным характеристикам // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2020. С. 74-77.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пономарев Алексей Иванович –
аспирант кафедры «Технология и системы
управления в машиностроении»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksey I. Ponomarev –
Postgraduate, Department of Control
Systems and Technologies in Mechanical
Engineering, Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Игнатьев Александр Анатольевич –
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технология и системы управления
в машиностроении» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander A. Ignatiev –
Dr. Sci. Tech., Professor,
Department of Control Systems
and Technologies in Mechanical Engineer-
ing, Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 24.02.20, принята к опубликованию 17.08.20

А.А. Чекалин, М.К. Решетников

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕТЕРОГЕННЫХ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ СПЛАЙНОВ

***Аннотация.** Интерполяционные сплайны широко применяются в инженерной практике для геометрического моделирования сложных криволинейных поверхностей изделий в различных отраслях промышленности. Этот в целом удобный математический аппарат имеет несколько ограничений. В статье предлагается расширение метода сплайн-функций добавлением новых видов сплайнов. Интегродифференциальные сплайны, предлагаемые авторами ранее в качестве самостоятельных математических инструментов, предлагается использовать в составе двумерных неоднородных сплайнов совместно с традиционными.*

***Ключевые слова:** интерполяция, аппроксимация, геометрическая модель, численные методы*

A.A. Chekalin, M.K. Reshetnikov

GEOMETRIC OPTIMIZATION OF THE SURFACE MODELS USING HETEROGENEOUS SPLINE INTERPOLATIONS

***Abstract.** Spline interpolation is widely used in many areas of engineering, including geometric modeling of composite curved surfaces of products for a variety of industries. In fact, this easy-to-use mathematical technique has a number of disadvantages. The article presents the possible extensions of the spline functions method by adding new types of splines. It is proposed that integrodifferential splines, originally presented as independent mathematical tools, should be used in combination with two-dimensional inhomogeneous splines alongside with traditional ones.*

***Keywords:** Interpolation, approximation, geometric model, numerical methods*

ВВЕДЕНИЕ

В инженерной геометрии поверхности представляют собой самый обширный и разнообразный класс геометрических объектов. Среди поверхностей выделяют примитивы – поверхности, определяемые единым уравнением, поверхности сложной структуры – совокупности примитивов, поверхности сложной формы, а также поверхности сложной формы и структуры [1, 2].

Самыми требовательными потребителями всех разделов геометрии традиционно являются такие отрасли как судостроение и авиастроение. Здесь форма поверхностей агрегатов является самой сложной и непосредственно влияет на функциональные параметры изделия. В конце 30-х годов XX века авиаконструктор Р. Бартини предложил использовать для описания поверхностей агрегатов летательных аппаратов аналитические методы в дополнение к графическим. Это послужило толчком для развития численных методов инженерной геометрии. Совершенствование вычислительной техники позволяет развивать эти методы.

С другой стороны, требования создателей систем автоматизированного проектирования и инженеров быстро растут. Программы усложняются, а объемы данных растут. Программисты знают, что как бы ни был велик объем носителей информации на современных компьютерах, проблема со свободным местом на носителях рано или поздно возникнет. То же касается мощности процессоров, объемов оперативной памяти вычислительных машин и др. Например, для разработки сложных геометрических форм используются персональные компьютеры с многоядерными процессорами, рабочие графические станции с несколькими процессорами [3].

Для дальнейших расчетов, таких как итоговая визуализация (получения растрового изображения трехмерной модели), используются локальные вычислительные сети. Однако модель может оказаться такой сложной, что для последней задачи приходится скрывать или временно удалять часть модели.

Таким образом, технические ограничения программно-вычислительного комплекса также заставляют разработчиков совершенствовать математический аппарат математического моделирования геометрических форм.

В авиа- и судостроении поверхность агрегата летательного или плавательного аппарата получают обычно опытным путем в виде физической масштабной модели. Затем возникает задача получить математическое выражение этой поверхности. А поскольку этого выражения нет, так как поверхность эмпирическая, конструкторам приходится решать задачу аппроксимации поверхности и отдельных линий, то есть подбора поверхности, максимально приближенной к исходной и удовлетворяющей некоторым наперед заданным условиям. Этими условиями могут быть, например, гладкость поверхности, плавность, отсутствие областей перегибов, ограничение на минимальный радиус и некоторые другие. С поверхности «снимается» точечный каркас и интерполируется наиболее подходящей алгебраической функцией. Понятно, что математическое выражение должно быть как можно проще. Наилучший выход – кусочно-гладкая интерполяция. Массив точек интерполируется дугами полиномов невысоких степеней. Аппроксимирующая поверхность практически всегда является кусочной, с минимальным необходимым, но достаточным параметром гладкости. Вообще говоря, аппроксимирующей может быть любая функция. Но в инженерной практике в подавляющем большинстве случаев для аппроксимации применяются различного вида сплайны.

Сплайны обладают хорошими аппроксимирующими свойствами: легко вычисляются, имеют хорошую сходимости, хорошие локальные свойства, легко изменяются на отдельных участках, приближают поверхность практически с любой точностью. Однако точность аппроксимации зависит от кусочности, а увеличение кусков, из которых состоит поверхность, увеличивает вычислительные затраты при решении дальнейших конструкторских и техноло-

гических задач. Это, например, задачи конструктивного деления поверхности на отсеки, построение эквидистантных поверхностей, конструирование технологической оснастки для производства, написание программ для ЧПУ и пр. К тому же иногда существует необходимость дальнейшего просчета аэро- и гидродинамических, прочностных и тому подобных характеристик поверхностей методами конечных элементов. В этих задачах большая кусочность также увеличивает вычислительные затраты.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предлагается для аппроксимации сложной технической поверхности использовать новые сплайн-функции, позволяющие уменьшить кусочность поверхности.

По известным причинам для решения указанных выше задач используются кривые третьего порядка: кривые в форме Фергюссона и Безье и кубические сплайны [4]. Для удобства стыковки кусков сплайна используются сплайны нечетных степеней, из которых сплайн первой степени – прямая – не обеспечивает точность и гладкость, а сплайн пятой степени имеет слишком много параметров – коэффициентов, геометрический смысл которых может быть непонятен при переходе к трехмерным объектам [5].

На интервале параметра x $[x_i, x_{i+1}]$ скалярная одномерная сплайн-функция третьей степени

$$y = S_3(x) = S_i\varphi_1 + S_{i+1}\varphi_2 + (S'_i\varphi_3 + S'_{i+1}\varphi_4)h_i, \quad (1)$$

где $\varphi_1(u) = 1 - 3u^2 + 2u^3$, $\varphi_2(u) = 3u^2 - 2u^3$, $\varphi_3(u) = u - 2u^2 + u^3$, $\varphi_4(u) = -u^2 + u^3$, $u = \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}$

$h_i = x_{i+1} - x_i$ – весовые функции Эрмита, S_i, S_{i+1} – значения функции на концах интервала. Краевые условия на концах однотипные, поэтому звенья сплайна легко состыкуются друг с другом в узловых точках $S_i, i=1 \dots N-1$. В этих точках первые производные двух смежных звеньев сплайна просто приравниваются. Неразрывность второй производной обеспечивается решением системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [5]. График такой функции представляет собой кривую с одной точкой перегиба в общем случае (рис. 1, а).

Предлагается использовать для интерполяции интегродифференциальные сплайны четных степеней: второй и четвертой [7].

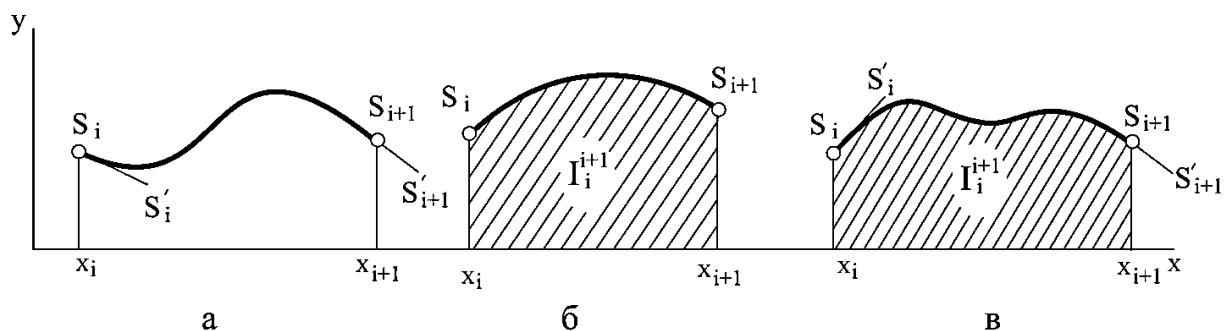


Рис. 1. Сплайн-функции второй, третьей и четвертой степеней

Квадратичный сплайн S_2 (квадратичный) имеет вид

$$S(u) = S_i\psi_1(u) + S_{i+1}\psi_2(u) + I_i^{i+1}\psi_3(u) / h_i, \quad (2)$$

где S_i и S_{i+1} начальное и конечное значение функции, $I_i^{i+1} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} S(t)dt$ – площадь плоскости под графиком функции определяется численным интегрированием, $\psi(u)$ – базисные функции второго порядка $\psi_1(u) = (1-u)(1-3u)$, $\psi_2(u) = (3u-2)u$, $\psi_3(u) = 6u(1-u)$, $u = \frac{t-t_i}{t_{i+1}-t_i}$, $h_i = t_{i+1} - t_i$. и изменяется в пределах $0 \leq u \leq 1$. График функции представляет собой параболу – кривую без точек перегиба (рис. 1, б). Количество параметров – коэффициентов сплайна S_2 – нечетное. Однако параметр I_i^{i+1} не является краевым. Звенья сплайна легко стыкуются. Формула сплайна S_2 не содержит параметра – первой производной. Непрерывность первой производной в узлах обеспечивается решением СЛАУ. Эта система, как и у кубического сплайна, содержит матрицу с диагональным преобладанием, только с двумя диагоналями, и поэтому также решается методом прогонки.

Сплайн-функция четвертой степени имеет вид

$$S_4(t) = S_i \varphi_1(t) + S_{i+1} \varphi_2(t) + [S'_i \varphi_3(t) + S'_{i+1} \varphi_4(t)] h_{i+1} + \frac{I_i^{i+1}}{h_{i+1}} \varphi_5(t), \quad (3)$$

где

$$\varphi_1(u) = (1+5u)(1-3u)(1-u)^2, \varphi_2(u) = (3u-2)(6-5u)u^2,$$

$$\varphi_3(u) = u(2-5u)(1-u)^2/2, \varphi_4(u) = (1-u)(3-5u)u^2/2, \varphi_5(u) = 30u^2(1-u)^2.$$

Здесь, как и в составе традиционного кубического сплайна, дифференциальные коэффициенты присутствуют явно, так же как и S_2 есть интегральный параметр. Построение сплайна начинается с задания интегральных коэффициентов. Они могут быть вычислены каким-либо методом численного интегрирования или замерены на реальной модели с использованием сканирующего устройства или координатно-измерительной. Впоследствии этими коэффициентами можно оперативно управлять формой кривой на отдельных участках. Дифференциальные коэффициенты высчитываются из СЛАУ, подобной системе для кубического сплайна. В общем случае сплайн описывает кривую четвертого порядка с двумя точками перегиба (рис. 1, в).

Для геометрического моделирования поверхности применяются двумерные сплайны. Сплайн-функция од двух переменных описывает в трехмерном пространстве кусок поверхности в явном виде на прямоугольном участке $[x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}]$:

$$\bar{W}_{33} = \varphi(u) \bar{F} \varphi^T(v), \quad (4)$$

где
$$S_{33} = \begin{pmatrix} S_{ij} & S_{i+1j} & D_{ij}^{10} & D_{i+1j}^{10} \\ S_{ij+1} & S_{i+1j+1} & D_{ij+1}^{10} & D_{i+1j+1}^{10} \\ D_{ij}^{01} & D_{i+1j}^{01} & D_{ij}^{11} & D_{i+1j}^{11} \\ D_{ij+1}^{01} & D_{i+1j+1}^{01} & D_{ij+1}^{11} & D_{i+1j+1}^{11} \end{pmatrix}, \varphi(u) = (\varphi_1(u), \varphi_2(u), \varphi_3(u)h_i, \varphi_4(u)h_i),$$

$$\varphi(v) = (\varphi_1(v), \varphi_2(v), \varphi_3(v)l_j, \varphi_4(v)l_j), u = \frac{s-s_i}{s_{i+1}-s_i}, v = \frac{t-t_j}{t_{j+1}-t_j}.$$

$D_{ij}^{10} = \frac{\partial S}{\partial x}$ и $D_{ij}^{01} = \frac{\partial S}{\partial y}$ – первые частные производные по параметрам x и y соответственно

$D_{ij}^{10} = \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}$ – вторые смешанные производные. При фиксированной одной переменной

сплайн представляет собой одномерный кубический сплайн (1) – так называемый частичный сплайн. Поверхность, составленная из кусков сплайна (4), должна быть гладкой на границах кусков (на линиях склейки). Это достигается решением СЛАУ [5].

Самый простой сплайн, который можно предложить для аппроксимации поверхности, – это биквадратичный ИД-сплайн:

$$S_{2,2} = \varphi(v)G\varphi^T(u), \tag{5}$$

Здесь

$$G = \begin{pmatrix} S_{ij} & S_{i+1j} & I_i^{i+1}(y_j) \\ S_{ij+1} & S_{i+1j+1} & I_i^{i+1}(y_{j+1}) \\ I_j^{j+1}(x_i) & I_j^{j+1}(x_{i+1}) & I_i^{i+1}I_j^{j+1} \end{pmatrix},$$

$$\varphi(u) = \left(\varphi_1(v), \varphi_2(v), \frac{\varphi_3(v)}{l_i} \right), \quad \psi(u) = \left(\psi_1(u), \psi_2(u), \frac{\psi_3(u)}{h_i} \right),$$

базисные функции $\psi(u)$ и $\varphi(v)$ квадратичного сплайна определены выше, $u = \frac{x - x_i}{h_i}$,

$$v = \frac{y - y_j}{l_j}, \quad h_i = x_{i+1} - x_i, \quad l_j = y_{j+1} - y_j.$$

$I_i^{i+1}(y_j) = \int_{x_i}^{x_{i+1}} S dx$ при $y = y_j$. Геометрический смысл этого параметра – площадь под границей куска сплайна (рис. 2).

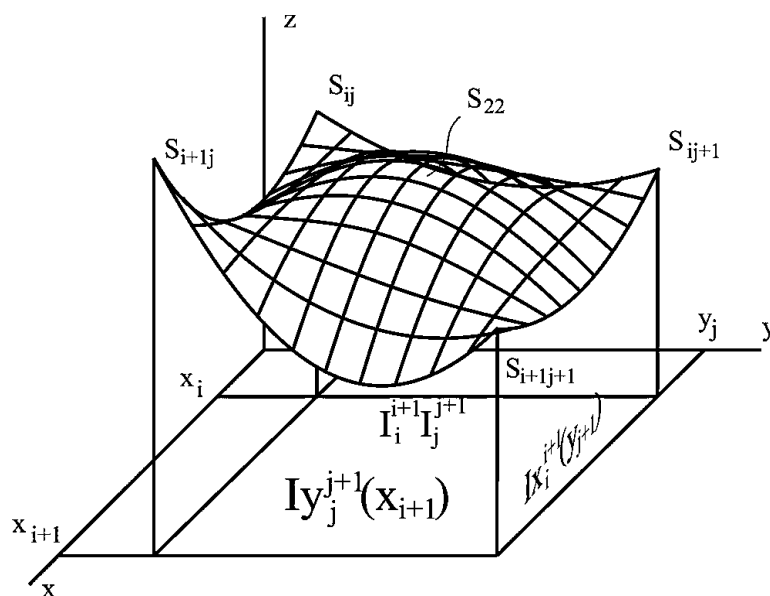


Рис. 2. Двумерный квадратичный сплайн

Этот и три других частичных интеграла являются краевыми условиями для куска поверхности. Полный интеграл $I_i^{i+1} I_j^{j+1} = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{y_j}^{y_{j+1}} S dx dy$ определяет объем, ограниченный поверхностью сплайна на области $[x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}]$. Гладкость составной поверхности на линиях склейки обеспечивается решением СЛАУ. Поверхность, описываемая сплайном S_{22} , определяется меньшим количеством коэффициентов, алгоритм ее расчета короче и требует меньше вычислений. Однако точность аппроксимации сплайном S_{22} ниже, чем бикубическим. Для достижения той же точности придется увеличить кусочность поверхности.

Двумерная сплайн-функция четвертой степени имеет вид

$$S(x, y) = \varphi^T(u) \bar{F} \varphi(v), \quad (6)$$

где
$$S = \begin{pmatrix} S_{i,j} & S_{i,j+1} & D_{i,j}^{01} & D_{i,j+1}^{01} & I_j^{j+1} y(x_i) \\ S_{i+1,j} & S_{i+1,j+1} & D_{i+1,j}^{01} & D_{i+1,j+1}^{01} & I_j^{j+1} y(x_{i+1}) \\ D_{i,j}^{10} & D_{i,j+1}^{10} & D_{i,j}^{11} & D_{i,j+1}^{11} & dI_j^{j+1} y(x_i) \\ D_{i+1,j}^{10} & D_{i+1,j+1}^{10} & D_{i+1,j}^{11} & D_{i+1,j+1}^{11} & dI_j^{j+1} y(x_{i+1}) \\ I_i^{i+1} x(s_i) & I_i^{i+1} x(y_{i+1B}) & dI_i^{i+1} x(y_i) & dI_i^{i+1} x(y_{i+1}) & I_i^{i+1} I_j^{j+1} \end{pmatrix},$$

$\varphi(u)$ и $\varphi(v)$ – матрицы весовых функций (3), $D_{ij}^{01} = \frac{\partial S(x_i, y_j)}{\partial x}$,

$$D_{ij}^{10} = \frac{\partial W(x_i, y_j)}{\partial y}, \quad D_{ij}^{11} = \frac{\partial^2 S(x_i, y_j)}{\partial x \partial y}.$$

Ячейка сплайновой поверхности задается двадцатью пятью значениями: значения сплайна в углах ячейки, частичные и смешанные производные в углах, интегралы $I_i^{i+1} x(y_j)$ и $I_j^{j+1} y(x_i)$ отрезков линий склейки, определенные для одномерного сплайна, полный интеграл. Здесь, как и ранее, интегральные параметры задаются, а дифференциальные – рассчитываются из СЛАУ. Эта модель сложнее, чем квадратичная кубическая. Однако точность аппроксимации такова, что позволит уменьшить кусочность поверхности в 6-9 раз. Это позволит значительно сократить вычислительные затраты при моделировании поверхностей сложной формы и сложной структуры за счет уменьшения количества булевых операций.

Иногда требования к моделируемой поверхности в различных топологических направлениях различны, в том смысле что сечение одной и той же поверхности в одном направлении может быть простым, а в другом – более сложным. Предлагается использовать в этих случаях комбинированный сплайн.

Теперь, когда у нас есть сплайны нескольких различных степеней, определим двумерный неоднородный, который далее будем называть гетерогенным.

Двумерная сплайн-функция $S_{2,3}$, содержащая в качестве частичных сплайны второй и третьей степени, будет иметь вид

$$S_{2,3} = \varphi(v) G \psi^T(u), \quad (7)$$

здесь

$$G = \begin{pmatrix} S_{ij} & S_{i+1j} & I_i^{i+1}(y_j) \\ S_{ij+1} & S_{i+1j+1} & I_i^{i+1}(y_{j+1}) \\ m_{ij} & m_{i+1j} & mI_i^{i+1}(y_i) \\ m_{ij+1} & m_{i+1j+1} & mI_i^{i+1}(y_{j+1}) \end{pmatrix},$$

$$\varphi(v) = (\varphi_1(v), \varphi_2(v), \varphi_3(v)l_j, \varphi_3(v)l_j), \quad \psi(u) = \left(\psi_1(u), \psi_2(u), \frac{\psi_3(u)}{h_i} \right),$$

базисные функции $\psi(u)$ и $\varphi(v)$ квадратичного и кубического сплайнов соответственно

определены выше, $u = \frac{x-x_i}{h_i}$, $v = \frac{y-y_j}{y_j}$, $h_i = x_i - x_{i+1}$, $l_j = y_j - y_{j+1}$.

$m_{ij} = \frac{\partial S(x_i, y)}{\partial y}$, $I_i^{i+1}(y_j) = \int_{x_i}^{x_{i+1}} S(x, y_j) dx$, $mI_i^{i+1}(y_j) = \frac{\partial I_i^{i+1}(y)}{\partial y}$. Последний коэффициент – производная по y от интеграл-функции (рис. 3).

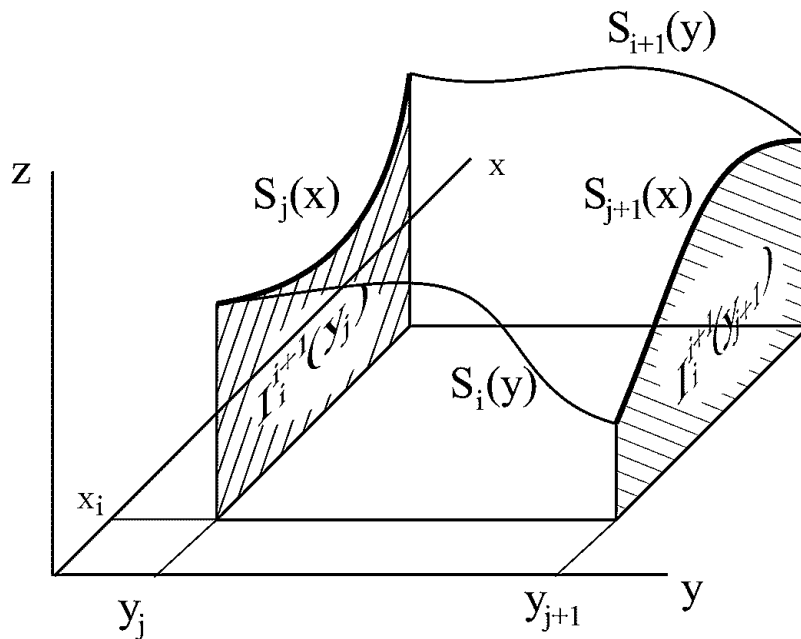


Рис. 3. Гетерогенный сплайн S_{23}

Для стыковки двух порций такой сплайн-функции вдоль линии склейки – квадратичного сплайна необходимо и достаточно рассчитать четыре коэффициента m_{ij} и два $mI_i^{i+1}(y_i)$ при известных остальных. Для стыковки двух порций вдоль кубического сплайна необходимо и достаточно рассчитать два коэффициента $I_i^{i+1}(y_i)$ [2] и два $mI_i^{i+1}(y_i)$ при известных остальных [1].

Двумерная сплайн-функция S_{34} имеет вид

$$S_{3,4} = \varphi(u)G\psi^T(v), \tag{8}$$

где

$$G = \begin{pmatrix} S_{ij} & S_{i+1j} & m^y_{ij} & m^y_{i+1j} & I_i^{i+1}(y_j) \\ S_{ij+1} & S_{i+1j+1} & m^y_{ij+1} & m^y_{i+1j+1} & I_i^{i+1}(y_{j+1}) \\ m^x_{ij} & m^x_{i+1j} & m^{xy}_{ij} & m^{xy}_{i+1j} & mI_i^{i+1}(y_i) \\ m^x_{ij+1} & m^x_{i+1j+1} & m^{xy}_{ij+1} & m^{xy}_{i+1j+1} & mI_i^{i+1}(y_{j+1}) \end{pmatrix},$$

$\varphi(u)$ и $\psi(v)$ – матрицы базисных функций 3 и 4 порядка соответственно.

При использовании этого сплайна появляется возможность локально оперативно управлять формой поверхности, оперируя интегральными коэффициентами.

ВЫВОДЫ

Предлагаемые двумерные сплайн-функции являются удобным и доступным математическим аппаратом для решения геометрических задач в части геометрического моделирования сложных технических поверхностей. Алгоритмы на их основе просты, легко программируются и могут быть добавлены в существующие системы автоматизированного проектирования.

Для моделирования кривых и поверхностей в инженерной геометрии применяются их параметрические представления. Например, сплайновая кривая определяется вектор-функцией со скалярными сплайн-функциями в качестве компонентов

$$\bar{V}(u) = \bar{i}S_x(u) + \bar{j}S_y(u) + \bar{k}S_z(u).$$

Сплайновая поверхность определяется

$$\bar{W}(u, v) = \bar{i}S_x(u, v) + \bar{j}S_y(u, v) + \bar{k}S_z(u, v).$$

Теперь моделирование кривой или поверхности в каждом случае сводится к построению отдельно трех скалярных сплайнов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Г.С. Конструирование технических поверхностей. М.: Машиностроение, 1982. 192 с.
2. Решетников М.К., Карачаровский В.Ю., Рязанов С.А. Визуализационная оценка геометрических характеристик контактирующей поверхности в червячных передачах на основе применения методов 3D компьютерной графики // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2014. № 2 (75). С. 106-108.
3. Шишкин Е.В., Плис А.Е. Кривые и поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. 240 с.
4. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве: пер. с англ. М.: Мир, 1982. 304 с.
5. Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее приложения. М.: Мир, 1972. 316 с.
6. Завьялов Ю.С., Квасов Ю.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. 350 с.

7. Чекалин А.А. Моделирование поверхности сложных технических поверхностей на основе интегродифференциальных сплайнов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1998. 23 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чекалин Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная геометрия и основы САПР» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey A. Chekalin – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Engineering Geometry and CAD Basics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Решетников Михаил Константинович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Инженерная геометрия и основы САПР» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail K. Reshetnikov – Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Head: Department of Engineering Geometry and CAD Basics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.07.20, принята к опубликованию 17.08.20

А.В. Черненко

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
КРУГЛОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ
СО СЛОЕМ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

Аннотация. Представлена математическая модель для изучения динамики круглой многослойной пластины, которая является нижней стенкой щелевого канала с вязкой жидкостью, давление в которой пульсирует за счет колебаний верхней стенки канала (жесткого диска). Сформулирована задача гидроупругости, на основе которой разработана математическая модель исследуемой механической системы. Рассматривалась задача стационарных осесимметричных гидроупругих колебаний при гармонических пульсациях давления жидкости. Данная модель может быть использована для разработки программного комплекса по расчету гидроупругого отклика круглой многослойной пластины в различных частотных диапазонах.

Ключевые слова: математическая модель, гидроупругость, вязкая жидкость, круглая многослойная пластина

A.V. Chernenko

**A MATHEMATICAL MODEL TO STUDY INTERACTION
OF A CIRCULAR MULTILAYER PLATE
WITH A VISCOUS LIQUID LAYER**

Abstract. The presented mathematical model is used in the study of the dynamics of a circular multi-layered plate being the bottom wall of the slotted channel with a viscous liquid, where vibrations in the upper wall of the channel (or hard drive) are due to pressure pulsations. The formulated hydroelasticity problem is the basis for a mathematical model of the analyzed mechanical system. The problem of stationary circularly symmetric hydroelastic oscillations under harmonic pressure pulsations in fluids has been considered. This model can be used to develop a software system to estimate the hydroelastic response of a circular multi-layered plate within various frequency ranges.

Keywords: mathematical model, hydroelasticity, viscous liquid, circular multilayer plate

ВВЕДЕНИЕ

Конструкции, состоящие из многослойных материалов, широко применяются в машиностроении. Обзор развития кинематических теорий для изучения деформированного со-

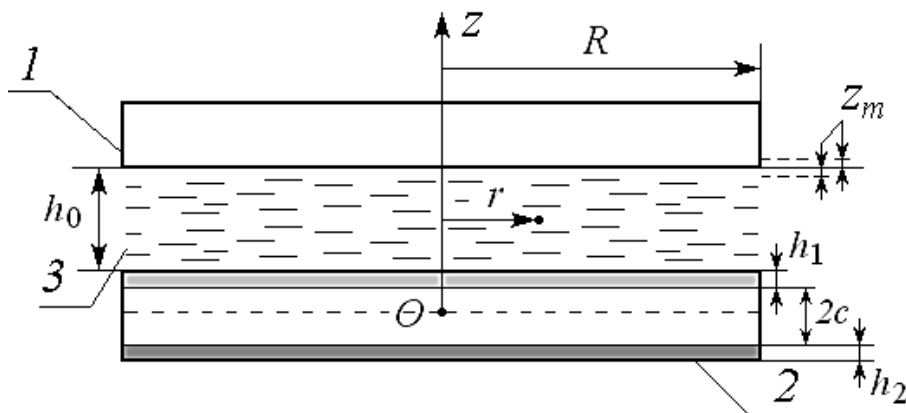
стояния многослойных элементов конструкций дан в [1]. Уравнения статики и динамики трехслойных балок и пластин получены и исследованы в рамках теории ломаной нормали в [2]. Задачи гидроупругих колебаний однородных пластин хорошо изучены. В одной из первых работ по исследованию гидроупругих колебаний круглой пластины [3] решение проведено с помощью энергетического метода Рэлея. В работах [4, 5] рассматривались колебания круглой пластины, взаимодействующей с идеальной жидкостью, на основе решения связанной задачи гидроупругости.

Решение, полученное в [3], дополнено учетом влияния вязкости жидкости в [6]. Продольные и поперечные колебания упругозакрепленных элементов конструкции рассмотрены в [7, 8], динамика взаимодействия элементов конструкции со сдвливаемым слоем жидкости изучена в [9, 10]. Взаимодействие слоя вязкой несжимаемой жидкости со стенками канала, вызванное вибрацией основания, на котором установлен канал, и устойчивость данных конструкций, взаимодействующих с неподвижной или текущей жидкостью, изучены в [11-14]. В [15, 16] рассмотрено взаимодействие вибрирующих пластин со слоем вязкой несжимаемой жидкости.

Но исследований взаимодействия многослойных конструкций (пластин) с жидкостью намного меньше. Можно указать работы [17-24], в которых изучались взаимодействия композитных и многослойных пластин и балок с жидкостью в разных постановках. Но в вышеперечисленных работах не исследовались радиальные и изгибные колебания круговой трехслойной пластины с учетом оказываемого влияния нормальных и касательных напряжений вязкой жидкости.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Изучим два соосных параллельных диска, образующих зазор, заполненный вязкой жидкостью. Верхний диск – жесткий, колеблющийся вдоль вертикальной оси. Нижний диск представляет собой трехслойную конструкцию, состоящую из лицевых листов и несжимаемого легкого заполнителя между ними (многослойная, а именно трехслойная пластина). Введем цилиндрическую систему координат с центром в центре легкого заполнителя. Схематично рассматриваемый канал показан на рисунке.



Канал, образованный двумя параллельными дисками:
1 – жесткий диск, 2 – трехслойная круглая пластина, 3 – вязкая жидкость

Здесь R – радиус верхнего и нижнего дисков, h_0 – зазор между стенками канала в невозмущенном состоянии, z_m – амплитуда колебаний верхнего диска, $2c$ – толщина заполнителя, h_1 – толщина верхнего диска, h_2 – толщина нижнего диска. Далее считаем, что $h_0 \ll R$ и $z_m \ll h_0$. Верхний диск совершает гармонические колебания с частотой ω . Трехслойный диск колеблется из-за пульсации давления жидкости, вызванной ее сдавливанием верхним жестким диском.

С учетом сил инерции пластины в радиальном и нормальном направлениях, согласно [2], получили уравнения динамики круглой многослойной пластины:

$$L_2 \left(a_1 u + a_2 \varphi - a_3 \frac{\partial w}{\partial r} \right) - M_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -q_{zr},$$

$$L_2 \left(a_2 u + a_4 \varphi - a_5 \frac{\partial w}{\partial r} \right) = 0,$$

$$L_3 \left(a_3 u + a_5 \varphi - a_6 \frac{\partial w}{\partial r} \right) - M_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -q_{zz},$$

$$L_2(g) = \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rg) \right], \quad L_3(g) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rL_2(g)],$$

$$q_{zr} = \rho v \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \text{ для } z = c + h_1,$$

$$q_{zz} = -p + 2\rho v \frac{\partial V_z}{\partial z} \text{ для } z = c + h_1, \quad (1)$$

$$M_0 = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 + \rho_3 h_3,$$

$$a_1 = h_1 K_1^+ + h_2 K_2^+ + 2c K_3^+, \quad a_2 = c(h_1 K_1^+ - h_2 K_2^+),$$

$$a_3 = h_1 \left(c + \frac{1}{2} h_1 \right) K_1^+ - h_2 \left(c + \frac{1}{2} h_2 \right) K_2^+, \quad a_4 = c^2 \left(h_1 K_1^+ + h_2 K_2^+ + \frac{2}{3} c K_3^+ \right),$$

$$a_5 = c \left(h_1 \left(c + \frac{1}{2} h_1 \right) K_1^+ + h_2 \left(c + \frac{1}{2} h_2 \right) K_2^+ + \frac{2}{3} c^2 K_3^+ \right),$$

$$a_6 = h_1 \left(c^2 + c h_1 + \frac{1}{3} h_1^2 \right) K_1^+ + h_2 \left(c^2 + c h_2 + \frac{1}{3} h_2^2 \right) K_2^+ + \frac{2}{3} c^3 K_3^+,$$

$$K_k^+ = K_k + \frac{4}{3} G_k,$$

где u – радиальное смещение пластины; w – прогиб пластины; φ – угол поворота деформированной нормали в сердечнике пластины; q_{zr} и q_{zz} – касательное и нормальное напряжения жидкости, действующие на поверхность верхней пластины, соответственно; V_r и V_z – проекции скорости жидкости на оси системы координат; G_k – модуль сдвига k -го слоя; K_k – объемный модуль k -го слоя; ρ_k – плотность материала k -го слоя. Выражения для a_1, \dots, a_6 получены в [2].

Примем, что движение жидкости между стенками зазора является ползущим [25]. Из этого следует, что уравнения динамики вязкой жидкости можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} &= \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} - \frac{V_r}{r^2} \right), \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= \nu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} V_r + \frac{\partial V_z}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь p – давление жидкости, ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, ρ – плотность жидкости.

Граничные условия уравнений (1), (2) имеют вид

$$\begin{aligned} w = u = \varphi = \frac{\partial w}{\partial r} &= 0 \text{ при } r = R, \\ r \frac{\partial w}{\partial r} &= 0 \text{ при } r = 0, \\ V_r = 0, V_z = \frac{dz^*}{dt} &\text{ при } z = h_0 + c + h_1, \\ V_r = \frac{\partial u}{\partial t}, V_z = \frac{\partial w}{\partial t} &\text{ при } z = c + h_1, \\ p = p_0 &\text{ при } r = R, \\ r \frac{\partial p}{\partial r} &= 0 \text{ при } r = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $z = h_0 + z_m f(\omega t)$ – закон движения жесткого диска, ω – частота колебаний жесткого диска.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТКЛИКА ПЛАСТИНЫ

Принимая во внимание малость зазора, т. е. $h_0 / R \ll 1$, согласно [11, 14, 18, 20, 24], уравнения динамики вязкой жидкости в канале можно упростить и представить в виде

$$\frac{1}{\nu \rho} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial^2 V_r}{\partial \alpha^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} V_r + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0.$$

Далее, решая уравнения (4) с соответствующими граничными условиями (2), находим выражения для напряжений, действующих на пластину со стороны тонкого слоя вязкой жидкости:

$$q_{zz} = -p_0 - \frac{\rho \nu R^2}{h_0^3} \left(3 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right) z_m \frac{df}{dt} + \frac{12}{R^2} \int_{r/R}^1 \left[\frac{1}{r} \int_0^r r \frac{\partial w}{\partial t} dr \right] dr, \quad (5)$$

$$q_{zr} = \frac{\rho \nu R}{h_0^2} \left(\frac{1}{R} \frac{6}{r} \int_0^r r \frac{\partial w}{\partial t} dr - 3 \left(\frac{r}{R} \right) z_m \frac{df}{dt} \right).$$

В результате подстановки уравнения (5) в уравнение (1) получим математическую модель в виде системы интегродифференциальных уравнений для исследования радиальных и изгибных колебаний многослойной пластины. Для данной модели форму упругих перемещений u , w и угол поворота φ согласно граничным условиям (3) можно представить в виде рядов:

$$w = w_m \sum_{k=1}^{\infty} R_k(t) \left[\frac{J_0(\beta_k r/R)}{J_0(\beta_k)} - \frac{I_0(\beta_k r/R)}{I_0(\beta_k)} \right],$$

$$u = -u_m \sum_{k=1}^{\infty} \beta_k Q_k(t) \left[\frac{J_1(\beta_k r/R)}{J_0(\beta_k)} + \frac{I_1(\beta_k r/R)}{I_0(\beta_k)} \right], \quad (6)$$

$$\varphi = -\varphi_m \sum_{k=1}^{\infty} \beta_k T_k(t) \left[\frac{J_1(\beta_k r/R)}{J_0(\beta_k)} + \frac{I_1(\beta_k r/R)}{I_0(\beta_k)} \right],$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка, J_1 – функция Бесселя первого порядка; I_0 – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка; I_1 – модифицированная функция Бесселя первого порядка; β_k является корнем трансцендентного уравнения $I_1(\beta_k)/I_0(\beta_k) = -J_1(\beta_k)/J_0(\beta_k)$ [2].

ВЫВОД

Сформулирована математическая модель для исследования гидроупругих колебаний круглой многослойной пластины, возникающих при пульсации давления в жидкости, вызванной колебаниями верхней стенки канала.

Данная модель может быть использована при разработке и анализе работы различных изделий машиностроения, включающих многослойные пластины, взаимодействующие с вязкой жидкостью. Например, их можно использовать в гидравлических системах, системах

смазки и охлаждения для разработки программного обеспечения по выбору допустимого диапазона частот их колебаний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) по проектам № 18-01-00127-а и № 19-01-00014-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carrera E. Historical review of zig-zag theories for multilayered plates and shells // Appl. Mech. Rev. 2003. 56(3) pp. 287-308.
2. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Яровая А.В. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций. М.: Физматлит, 2005. 576 с.
3. Lamb H. On the vibrations of an elastic plate in contact with water // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1920. 98 (690). pp. 205-216.
4. Amabili M., Kwak M.K. 1996 Free vibrations of circular plates coupled with liquids: revising the Lamb problem // Journal of Fluids and Structures. 10 (7). pp. 743-761.
5. Askari E., Jeong K.-H., Amabili M. Hydroelastic vibration of circular plates immersed in a liquid-filled container with free surface // Journal of Sound and Vibration. 2013. 332 (12) pp. 3064-3085.
6. Kozlovsky Y. 2009 Vibration of plates in contact with viscous fluid: Extension of Lamb's model Journal of Sound and Vibration 326 pp 332-339.
7. Попов В.С., Попова А.А. Моделирование взаимодействия стенки канала с упругозакрепленным торцевым уплотнением // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12. № 2. С. 387-400.
8. Могилевич Л.И., Попов В.С., Попова А.А. Продольные и поперечные колебания упругозакрепленной стенки клиновидного канала, установленного на вибрирующем основании // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 3. С. 28-36.
9. Могилевич Л.И., Попов В.С., Попова А.А. Динамика взаимодействия упругих элементов вибромашины со сдвливаемым слоем жидкости, находящимся между ними // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 4. С. 23-32.
10. Попова А.А. Математическая модель колебаний диска, имеющего упругую связь с жесткой восстанавливающей силой // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2018. № 3. С. 13-24.
11. Могилевич Л.И., Попов В.С. Исследование взаимодействия слоя вязкой несжимаемой жидкости со стенками канала, образованного соосными вибрирующими дисками // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 3. С. 42-55.
12. Бочкарев С.А., Лекомцев С.В., Матвеев В.П. Гидроупругая устойчивость прямоугольной пластины, взаимодействующей со слоем текущей идеальной жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 6. С. 108-120.
13. Вельмисов П.А., Анкилов А.В. Динамическая устойчивость пластины, взаимодействующей с вязкой жидкостью // Кибернетика и физика 6(4). С. 262-270.
14. Kondratov D.V., Mogilevich L.I., Popov V.S., Popova A.A. Hydroelastic oscillations of a circular plate, resting on Winkler foundation // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 944 012057.

15. Попов В.С. Динамическая задача гидроупругости виброопоры с пластиной, подкрепленной ребрами жесткости // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. № 3. Вып. 1. С. 7-13.

16. Попова А.А. Математическое моделирование динамических процессов в виброопоре с упругими элементами конструкции // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. Т. 1. № 4. С. 25-31.

17. Kramer M.R., Liu Z, Young Y.L. Free vibration of cantilevered composite plates in air and in water // Composite Structures. 2013. Vol. 95. pp. 254-263.

18. Агеев Р.В., Могилевич Л.И., Попов В.С. Колебание стенок щелевого канала с вязкой жидкостью, образованного трехслойным и твердым дисками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 1. С. 3-11.

19. Viscous Fluid Structure Interaction Response of Composite Hydrofoils / Y. Liao, N. Garg, R.R.A. Martins Joaquim, Y.L. Young // Composite Structures. 2019. 212. Pp. 571-585.

20. Hydroelastic response of three-layered beam resting on Winkler foundation / L.I. Mogilevich, V.S. Popov, A.A. Popova, A.V. Christoforova // Journal of Physics: Conference Series 2019. Vol. 1210 (1). 012098.

21. Grushenkova E.D., Mogilevich L.I., Popov V.S. et al. Mathematical model of oscillations of a three-layered channel wall possessing a compressible core and interacting with a pulsating viscous liquid layer // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2019. № 6. pp. 4-18.

22. Гидроупругая реакция трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем, взаимодействующей со штампом через слой вязкой жидкости / Т.В. Быкова, Е.Д. Грушенкова, В.С. Попов, А.А. Попова // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2020. Т. 20. № 3. С. 351-366.

23. Kondratov D.V., Popov V.S., Popova A.A. 2020. Hydroelastic oscillations of three-layered channel wall resting on elastic foundation // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). pp. 903-911.

24. Радиальные и изгибные колебания круглой трехслойной пластины, взаимодействующей с пульсирующим слоем вязкой жидкости / Т.В. Быкова, Л.И. Могилевич, В.С. Попов, А.А. Попова, А.В. Черненко // Труды МАИ. 2020. Вып. 110. DOI: 10.34759/trd-2020-110-6

25. Lamb H. Hydrodynamics. 6th ed. New York: Dover Publications Inc., 1975. 752 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Черненко Александр Викторович – аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander V. Chernenko – Postgraduate, Department of Automated Information Systems Security, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 629.113.004.67

А.С. Денисов, Р.К. Галиев, А.Т. Кулаков

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЗОТИРОВАННЫХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

Аннотация. Для высокофорсированных дизелей КАМАЗ необходимо повышать усталостную прочность и износостойкость шеек коленчатого вала. Рассматривается применение объемного азотирования коленчатых валов из стали 42ХМФА. Представлены результаты исследований микротвердости коленчатых валов разных видов поверхностного упрочнения. Обоснованы основные направления повышения качества коленчатого вала. Обоснована необходимость внедрения и использования разработанных способов стабилизации геометрических параметров шатунных вкладышей с целью повышения ремонтпригодности коленчатых валов и продления ресурса двигателей.

Ключевые слова: коленчатый вал, усталостная прочность, сталь, азотирование, ресурс, долговечность

A.S. Denisov, R.K. Galiev, A.T. Kulakov

PERFORMANCE ANALYSIS OF NITRIDED CRANKSHAFTS

Abstract. Increasing fatigue strength and wear resistance of crankshaft necks for highly accelerated KAMAZ diesel engines is of critical importance. The focus is made on volumetric nitriding of crankshafts made of 42XMFA steel. The research results relating microhardness of crankshafts with various types of surface hardening are presented. The main directions for improving the crankshaft quality are substantiated. The need for introduction and application of the method developed to change the geometries of connecting rods with the purpose to increase the maintainability of crankshafts and extend the service life of engines has been proved.

Keywords: crankshaft, fatigue strength, steel, nitriding, service life, durability

ВВЕДЕНИЕ

Применяемая на двигателях КАМАЗ-740 для коленчатых валов (КВ) сталь 42ХМФА разработана для изготовления азотированных коленчатых валов. Однако на КАМАЗе при массовом производстве двигателей предпочтение было отдано упрочнению коленчатых валов индукционной закалкой. Индукционная закалка имеет ряд преимуществ: в производстве – простота и высокая производительность; в эксплуатации – хорошая ремонтпригодность. Однако для высокофорсированных дизелей КАМАЗ необходимо значительно повысить усталостную прочность и износостойкость шеек коленчатого вала. Этим требованиям отвечает применение объемного азотирования коленчатых валов из стали 42ХМФА.

Наиболее распространенным методом поверхностного пластического деформирования коленчатых валов является химико-термический (азотирование), обеспечивающий повышение износостойкости и предела выносливости. Физические основы азотирования – процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев шеек вала азотом. На рис. 1 показаны результаты исследований микротвердости коленчатых валов разных видов поверхностного упрочнения. В статье использованы результаты исследований ОАО «КАМАЗ» и ОАО «НИИТавтопром» [1, 2].

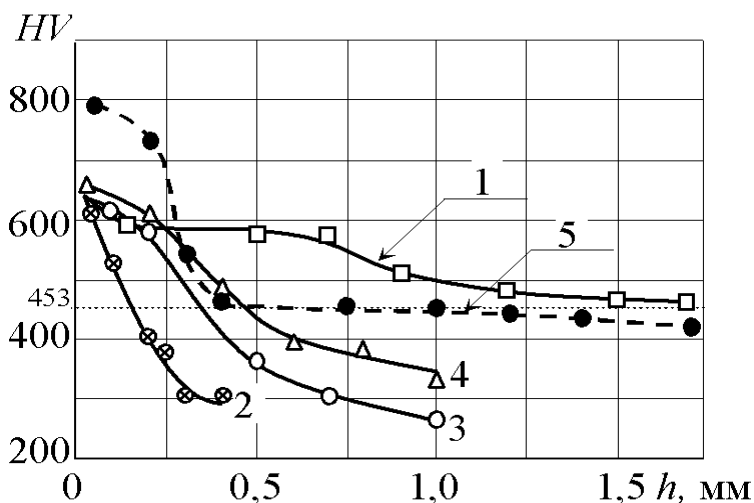


Рис. 9. Зависимость микротвердости от глубины упрочненного слоя:
 1 – закалка ТВЧ; 2 – ионное азотирование, сердцевина 248 HV 10/3000;
 3 – карбонитрирование, сердцевина 255 HV 5/750/10; 4 – карбонитрирование, сердцевина 341 HV 5/750/10; 5 – комбинированное упрочнение (ТВЧ + отпуск при $t = 600 \pm 10^\circ\text{C}$ 4 часа + ионное азотирование), сердцевина 241 HV 5/750/10

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существует три принципиально разных способа азотирования коленчатых валов: газовое в аммиаке, ионное (в тлеющем разряде) и азотирование в жидких средах.

Замеры микротвердости выполнены по $HV_{0,3}$ по сечениям, перпендикулярным к исследуемым поверхностям. С точки зрения обеспечения ремонтпригодности минимальная допустимая твердость поверхности равна 453 $HV_{0,3}$ (45 HRC). Это подтверждено испытаниями на надежность в объеме 1000 часов дизеля КАМАЗ-740.11-240 [1, 2].

Ионное азотирование имеет наименьшую глубину обработки. Коленчатые валы, подвергнутые ионному азотированию, могут быть восстановлены перешлифовыванием на категорию ремонтного размера 0,5 при естественном износе в эксплуатации. При задирах перешлифовывание через ремонтный размер приводит к значительному снижению твердости (сырой металл).

Каталитическое азотирование (карбонитрирование) с твердостью сердцевины 255 *HB* 5/750/10 обеспечивает минимально допустимую микротвердость на глубине около 0,4 мм, что выше, чем для ионного азотирования. Восстановление коленчатых валов в этом случае возможно на категории ремонтного размера 0,5÷1 как при естественном износе, так и при задирах вкладышей в эксплуатации.

Повышение твердости сердцевины до 341 *HB* 5/750/10 увеличивает категорию ремонтного размера до 1,5. Наилучшие результаты по критерию ремонтпригодности обеспечивает комбинированное упрочнение (индукционная закалка + стабилизирующий отпуск при температуре 600÷10°C в течение 4 часов + ионное азотирование) с твердостью сердцевины 241 *HB* 5/750/10. Перешлифовка допускается на категории ремонтного размера 0,5÷3.

Коленчатые валы с радиусом кривошипа *R65* и *R60* подвергались ионному азотированию шеек. При этом твердость сердцевины равнялась *HB* 321. Анализ выявил, что применение азотирования шеек для вала *R60* увеличивает предел выносливости на 11%. Для вала с радиусом кривошипа *R65* без грязеуловителей предел выносливости на кручение повышается на 21%. Запас прочности шатунной шейки на кручение для высокофорсированного дизеля КамАЗ-740.50-360 равен $n_{кр} = 3,9$ [3].

Таким образом, основными направлениями повышения качества коленчатого вала является: выбор химического состава металла и способа его получения; вид и качество химико-термической обработки; снижение концентраций напряжений за счет улучшения механической обработки и конструкции элементов (галтели, масляные каналы); совершенствование методов усталостных испытаний; обеспечение ремонтпригодности в течение всего эксплуатационно-ремонтного цикла. Усталостные испытания коленчатого вала позволили обосновать и ввести ремонтные размеры Р6 и Р7.

Проведенные исследования [1] показывают, что отказ по задирам шеек коленчатого вала наступает задолго до выработки ресурса базовых деталей двигателя КАМАЗ-740 и в капитальный ремонт отправляются двигатели с невыработанным ресурсом даже по шейкам коленчатого вала. По данным [2] минимальный ресурс двигателя КАМАЗ-740, определенный в результате наблюдения в эксплуатационных условиях, составляет 223 тыс. км (до перешлифовывания шеек коленчатого вала, фактически определяющего необходимость выполнения капитального ремонта). Это значительно выше наработки двигателей, отправляемых в ремонт, – 125-153 тыс. км [2], 25% которых – из-за проворачивания шатунных вкладышей.

Относительно низкие наработки двигателей КАМАЗ-740 до отправки в ремонт вызваны устоявшейся системой эксплуатации и ремонтов в условиях АТП до предельного состояния. В силу указанных причин при назначенном заводом-изготовителем ресурсе (равном 300 тыс. км до капитального ремонта, а для 3-й категории условий эксплуатации составляющем 240 тыс. км), двигатель за указанный период (240 тыс. км) проходит фактически два ка-

питальных ремонта. Это приводит к дополнительным затратам на запасные части, а также к утрате остаточного ресурса базовых частей. Двигателям, которые выходят из строя по причине проворачивания шатунных вкладышей и задира шеек коленчатого вала (КВ), можно продлить срок эксплуатации до назначенного ресурса (240 тыс. км) за счет замены вкладышей с рекомендуемыми условиями монтажа или с предохранительными элементами и исключить практически один промежуточный капитальный ремонт. Дополнительный экономический эффект может быть получен от снижения простоев автомобиля из-за ремонта двигателей, повышения производительности автомобилей, снижения затрат на транспортировку двигателей на ремонтные заводы, уменьшения дорожных отказов автомобилей по техническим причинам.

Используя обоснованную наработку до замены вкладышей (предупредительный ремонт) и рекомендованную в работе [3] структуру эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей КамАЗ-740 в третьей категории условий эксплуатации, в которой вторичный ресурс двигателей составляет в среднем 80 тыс. км, рассмотрим потребность на 100 автомобилей в год в коленчатых валах из-за их неремонтопригодности. При этом учтем, что при предупредительном ремонте (ПР) согласно [3] неремонтопригодными являются 5% КВ, а при капитальном ремонте (КР) в соответствии с анализом дефектов КВ, приведенным в работе [3], – 16%. Из этого количества неремонтопригодных КВ по причине задира шеек (поворачивания вкладышей) при ПР – 1%, а при КР – 6%. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расход КВ по наработке двигателей КамАЗ-740
из-за неремонтопригодности по четырем ремонтным размерам

| Наработка, тыс. км | Вид ремонта | Номер рем. раз- мера КВ | Замена КВ, % | | Затраты, тыс. руб. | | Затраты суммарные, тыс. руб. | |
|-----------------------|----------------|-------------------------------|--------------|-----------|--------------------|-----------|---------------------------------|-----------|
| | | | всего | по задиру | всего | по задиру | всего | по задиру |
| | | | | | | | | |
| 120 | ПР | 0 | 5 | 1 | 3,5 | 0,7 | 3,5 | 0,7 |
| 200 | КР | 1 | 16 | 6 | 11,2 | 4,2 | 14,7 | 4,9 |
| 280 | ПР | 1 | 5 | 1 | 3,5 | 0,7 | 18,2 | 5,6 |
| 360 | КР | 2 | 16 | 6 | 11,2 | 4,2 | 29,4 | 9,8 |
| 440 | ПР | 2 | 5 | 1 | 3,5 | 0,7 | 32,9 | 10,5 |
| 520 | КР | 3 | 16 | 6 | 11,2 | 4,2 | 44,1 | 14,7 |
| 600 | ПР | 3 | 5 | 1 | 3,5 | 0,7 | 47,6 | 15,4 |
| 680 | КР | 4 | 16 | 6 | 11,2 | 4,2 | 58,8 | 19,6 |
| 760 | ПР | 4 | 5 | 1 | 3,5 | 0,7 | 62,3 | 20,3 |
| 840 | СП | – | – | – | – | – | 62,3 | 20,3 |

Примечание: СП – списание; суммарные затраты – затраты нарастающим итогом.

В данных расчетах не учтено то, что при шлифовании КВ на ремонтный размер бывают случаи шлифования через ремонтный размер (перескок), особенно при задирах. Стоимость КВ принята согласно прейскуранту 70 тыс. рублей.

Как сказано ранее, одним из емких показателей ремонтнопригодности является объединенная удельная оперативная стоимость технических обслуживаний и ремонтов. Повыше-

ние ремонтпригодности КВ происходит за счет сокращения их выбраковки по причине задира шеек. Поэтому рассмотрим только часть этого показателя, связанную с выбраковкой КВ, в том числе и по задирам.

Удельные затраты, связанные с общей выбраковкой КВ к концу его ресурс, составляют

$$C' = (C_{np} + C_{кр})/l = 62,3/840 = 0,074 \text{ руб./км.}$$

Поскольку при рекомендуемой по результатам исследования [1] наработке до ремонта подшипников КВ вероятность отказа (проворачивания вкладышей, задира шеек) составляет 0,05, то снижение удельных затрат составит

$$\Delta C' = 20,3 \cdot 0,95/840 = 0,023 \text{ руб./км.}$$

Относительное снижение удельных затрат из-за сокращения задиров составляет 31% (табл. 2).

Таблица 2

Удельные затраты из-за сокращения задиров шеек КВ

| Наработка, тыс. км | Вид ремонта | № рем. размера КВ | Замена КВ, % | Затраты, тыс. руб. | Затраты суммарные, тыс. руб. |
|--------------------|-------------|-------------------|--------------|--------------------|------------------------------|
| 145 | ПР | 0 | 5 | 3,5 | 3,5 |
| 270 | КР | 1 | 16 | 11,2 | 14,7 |
| 380 | ПР | 1 | 5 | 3,5 | 18,2 |
| 480 | КР | 0 | 100 | 70 | 88,2 |
| 600 | ПР | 0 | 5 | 3,5 | 91,7 |
| 700 | КР | 1 | 16 | 11,2 | 102,9 |
| 800 | ПР | 1 | 5 | 3,5 | 106,4 |
| 880 | СП | 1 | – | – | 106,4 |

В работе [4] обоснована общая структура эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей КАМАЗ-ЕВРО в третьей категории условий эксплуатации следующая: 1 ПТР – 75 тыс. км; 1 ПР – 145 тыс. км; 2 ПТР – 205 тыс. км; КР – 270 тыс. км; 3 ПТР – 330 тыс. км; 2 ПР – 380 тыс. км; 4 ПТР – 430 тыс. км; списание (СП) – 480 тыс. км.

Важно отметить, что исследования показали [4], что одним из основных факторов, обеспечивающих максимальную износостойкость трущейся поверхности, является пластичность поверхностной зоны. Однако если на поверхности трения имеется низкая пластичность, образованная при азотировании высокоазотными соединениями, это может привести к развитию усталостных трещин при упругом деформировании и к выкрашиванию поверхностного слоя. Износостойкость азотированного слоя определяется режимом азотирования и химическим составом материала трущейся поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, внедрение и использование разработанных способов стабилизации геометрических параметров шатунных вкладышей позволяет повысить ремонтпригодность КВ и продлить ресурс двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обеспечение качества коленчатого вала автомобильного дизеля / В.Н. Никишин, А.Т. Кулаков, А.С. Денисов, А.А. Видинеев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4. С. 69-76.
2. Исследование ремонтпригодности коленчатых валов двигателей КамАЗ. Технический отчет НТЦ «КамАЗ». Набережные Челны, 2004. 56 с.
3. Галиев Р.К. Обеспечение ремонтной технологичности азотированных коленчатых валов автомобильных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Галиев Рафис Кашфелович; [Место защиты: Оренбургский государственный университет]. Оренбург, 2015. 128 с.
4. Марьина Н.Л. Азотирование коленчатых валов дизель-генераторов // Перспективы развития науки (Perspektywy rozwoju nauki): материалы Междунар. науч. конф. Гданьск, 28-30 нояб. 2012 г. Гданьск / Gdańsk, 2012. С. 38-42.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Денисов Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr S. Denisov – Dr. Sc. Tech., Professor, Department of Transportation, Traffic Safety and Car Service, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Галиев Рафис Кашфелович – кандидат технических наук, директор ЗЗЧиК ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны

Rafis K. Galiev – Ph.D. (Engineering), Director of PAO KAMAZ, Naberezhnye Chelny

Кулаков Александр Тихонович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации автомобильного транспорта Набережночелнинского института (филиала) Казанского федерального университета

Aleksandr T. Kulakov – Dr. Sc. Tech., Professor, Head: Department of Motor Vehicles Operation, Naberezhnye Chelny Institute, (branch) of Kazan Federal University

Статья поступила в редакцию 15.06.20, принята к опубликованию 17.08.20

В.А. Кузнецов, А.В. Королев

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

Аннотация. С помощью термодинамических методов получено качественное представление об изменении остаточных напряжений в металлах под действием упругих деформаций.

Ключевые слова: напряжения, термодинамика, термоупругость, энтропия, коэффициент жесткости

V.A. Kuznetsov, A.V. Korolev

**THERMODYNAMIC METHODS FOR RESIDUAL
STRESS RELAXATION IN METALS**

Abstract. A qualitative understanding of the changes in residual stresses in metals under the action of elastic deformations has been obtained using thermodynamic methods.

Keywords: stresses, thermodynamics, thermoelasticity, entropy, stiffness coefficient

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при механической и термической обработке металлов между зернами возникают микропластические сдвиги, в результате которых возникают напряжения первого рода. При этом структура металла переходит в неравновесное состояние, а возникшие в металле напряжения сдвига τ являются движущей силой возврата к равновесному состоянию. Удельная потенциальная энергия металла, вызванная касательными напряжениями, равна

$$u = \frac{\tau \cdot (1 + \mu)}{E}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала; μ – коэффициент Пуассона.

Как любая неравновесная термодинамическая система, металл имеет значение энтропии, изменение которой определяется равенством

$$dS = dS_v + dS_n, \quad (2)$$

где dS_v – изменение, вызванное внутренними свойствами системы, dS_n – изменения, связанные с внешними факторами.

Напряжения первого рода характерны тем, что при их изменении возникает деформация металла, приводящая к потере точности изделий. Поэтому от этих напряжений в процессе изготовления изделий пытаются избавиться [13, 14].

Одним из методов удаления остаточных напряжений является упругая деформация металла. Длительное время считалось, что упругая деформация не вносит никаких изменений в структуру металла. На самом деле исследование явления упругого гистерезиса показывает, что под действием упругой деформации часть энергии упругой деформации поглощается металлом, в результате чего уменьшаются остаточные напряжения и возникает остаточная деформация.

К наиболее эффективным методам исследования процесса релаксации остаточных напряжений относятся методы термодинамического анализа [1-4]. Применение термодинамических методов обусловлено характером протекания процессов и позволяет выделить наиболее общие и наиболее конкретные признаки физики этих процессов.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Рассмотрим изделие в виде металлического стержня, в котором имеются остаточные напряжения. Энергия остаточных напряжений определяется равенством 1. Приложим к стержню вращательный момент N , который закручивает стержень на угол φ . Для такого случая справедливо соотношение

$$dN = Gld\varphi, \quad (3)$$

где l – плечо действующей силы, G – модуль сдвига.

Элементарная работа по закручиванию стержня равна

$$dA = Nd\varphi. \quad (4)$$

Будем считать, что имеют место следующие функциональные зависимости: $N = N(T, \varphi)$ и $U = U(T, \varphi)$, где U – внутренняя энергия, T – температура. Найдем полный дифференциал от внутренней энергии:

$$dU = \left(\frac{dU}{dT}\right)_{\varphi} dT + \left(\frac{dU}{d\varphi}\right)_T d\varphi. \quad (5)$$

С учетом формул (4) и (5) первое начало термодинамики примет вид

$$dQ = \left(\frac{dU}{dT}\right)_{\varphi} dT + \left(\left(\frac{dU}{d\varphi}\right)_T + N\right) d\varphi. \quad (6)$$

По определению теплоемкости имеем

$$C = \frac{dQ}{dT} = \left(\frac{dU}{dT}\right)_{\varphi} + \left(\left(\frac{dU}{d\varphi}\right)_T + N\right) \left(\frac{d\varphi}{dT}\right)_N.$$

Введем обозначения:

$$C_{\varphi} = \left(\frac{dU}{dT}\right)_{\varphi}.$$

$$C_N = C_\varphi + \left(\left(\frac{dU}{d\varphi} \right)_T + N \right) \left(\frac{d\varphi}{dT} \right)_N. \quad (7)$$

$$\rho = \frac{C_N}{C_\varphi} - \text{аналог показателя адиабаты.} \quad (8)$$

При выполнении условия адиабатичности ($dQ = 0$) уравнение (6) преобразуется к виду

$$dT + (\rho - 1) \left(\frac{dT}{d\varphi} \right)_N d\varphi = 0. \quad (9)$$

Определив полный дифференциал температуры в координатах N, φ и используя его в преобразовании уравнения (9), получим

$$dN + \left(\frac{dN}{d\varphi} \right)_\rho d\varphi = 0. \quad (10)$$

Из уравнения (10) определим

$$\left(\frac{dN}{d\varphi} \right)_\rho = -\rho \frac{\left(\frac{dT}{d\varphi} \right)_N}{\left(\frac{dT}{dN} \right)_\varphi}. \quad (11)$$

$$\left(\frac{dN}{d\varphi} \right)_N = -\frac{\left(\frac{dT}{d\varphi} \right)_N}{\left(\frac{dT}{dN} \right)_\varphi}. \quad (12)$$

Используя соотношение (3), можно записать выражения для G_Q и G_T – модулей сдвига при адиабатическом и изотермическом процессе:

$$G_Q = \frac{\left(\frac{dN}{d\varphi} \right)_\rho}{l}, \quad (13)$$

$$G_T = \frac{\left(\frac{dN}{d\varphi} \right)_T}{l}, \quad (14)$$

Подставляя формулы (11) и (12) в соотношения (13) и (14), получим

$$\rho = \frac{G_Q}{G_T}. \quad (15)$$

Поскольку $\rho \geq 1$, модуль сдвига при изотермическом закручивании меньше или равен модулю сдвига при адиабатическом закручивании, что может повлиять на выбор способа подведения тепла при закручивании стержня.

Рассмотрим, как ведет себя такой термодинамический параметр как энтропия (S) при определенном виде деформаций с учетом температурной зависимости обратного коэффициента жесткости (α). Пусть деформация характеризуется законом, описываемым в следующем виде:

$$\alpha F = x, \quad (16)$$

где: F – сила, x – удлинение.

Будем считать, что изменение x может быть обусловлено изменением F при постоянной температуре T и изменением T при постоянной F :

$$dx = \alpha dF + F \frac{\partial \alpha}{\partial T} dT. \quad (17)$$

Уравнение для внутренней энергии будет иметь вид

$$dQ + \frac{\alpha}{2} d(F^2) + F^2 \frac{\partial \alpha}{\partial T} dT = dU = \frac{\partial U}{\partial(F^2)} d(F^2) + \frac{\partial U}{\partial T} dT. \quad (18)$$

Воспользуемся понятием энтропии, для которого выполняется условие полного дифференциала. Тогда существует некоторая функция $S(\alpha, F^2)$, зависящая от температуры:

$$dS = \frac{\partial S}{\partial T} dT + \frac{\partial S}{\partial F^2} d(F^2). \quad (19)$$

Используя уравнения (18), (19), получим

$$dS = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial U}{\partial T} - F^2 \frac{\partial \alpha}{\partial T} \right) dT + \frac{1}{T} \left(\frac{\partial U}{\partial F^2} - \frac{\alpha}{2} \right) d(F^2). \quad (20)$$

Воспользуемся свойствами смешанных производных и получим и решим уравнение относительно функции U :

$$U = U_0(T) + \left(\alpha + T \frac{\partial \alpha}{\partial T} \right) \frac{F^2}{2}, \quad (21)$$

где: $U_0(T)$ – составляющая, которая не зависит от F^2 .

Сравнивая уравнения (19) и (20), находим

$$\frac{\partial S}{\partial T} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial U}{\partial T} - F^2 \frac{\partial \alpha}{\partial T} \right), \quad (22)$$

$$\frac{\partial S}{\partial F^2} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial U}{\partial F^2} - \frac{\alpha}{2} \right). \quad (23)$$

Подставив соотношение (21) в уравнение (22) и (23), получим

$$\frac{dS}{dT} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial U_0}{\partial T} + \frac{F^2}{2} \left(T \frac{\partial^2 \alpha}{\partial T^2} \right) \right), \quad (24)$$

$$\frac{dS}{\partial F^2} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial U_0}{\partial F^2} + \frac{T}{2} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial T} \right). \quad (25)$$

Найдем смешанные произведения:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial T \partial F^2} = \frac{1}{T} \cdot \frac{\partial^2 U_0}{\partial T \partial F^2} + \frac{1}{T} \left(\frac{T}{2} \cdot \frac{\partial^2 \alpha}{\partial T^2} \right), \quad (26)$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial F^2 \partial T} = -\frac{1}{T^2} \cdot \frac{\partial U_0}{\partial F^2} + \frac{1}{T} \cdot \frac{\partial U_0}{\partial F^2 \partial T} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 \alpha}{\partial T^2}. \quad (27)$$

Сравнивая формулы (26) и (27), видим, что равенство смешанных производных выполняется в том случае, если

$$\frac{\partial U_0}{\partial F^2} = 0. \quad (28)$$

Интегрируя выражения (24) и (25), с учетом условия (28) получим

$$S = \frac{F^2}{2} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial T} + S_0(T) + const, \quad (29)$$

где $S_0(T)$ – энтропия, описывающая только линейное температурное воздействие.

Анализируя формулу (29), можно сделать вывод, что если частная производная от α меньше нуля, то энтропия уменьшается с увеличением силы. Это имеет место в случае, когда сила вызывает упругую деформацию стержня. Следовательно, при упругой деформации стержня внутренняя энергия материала стержня (1) уменьшается, а остаточные напряжения снижаются. Если сила вызывает пластическую деформацию, то частная производная от α больше нуля. В этом случае остаточные напряжения в металле возрастают. Таким образом, величина энтропии может служить критерием при прогнозировании поведения материала при термоупругих деформациях в случае реализации сделанного предположения о характере температурной зависимости обратного коэффициента жесткости.

Более общим является подход, основанный на динамической модели цепочки колеблющихся атомов, в которой применяется система классических уравнений Ньютона и законов термодинамики, с помощью которых можно получить выражение для температурной зависимости энтропии. Это выражение позволяет оценить структурные изменения твердого тела, которые в условиях сохранения дальнего порядка при температурах, отличных от температуры плавления, проявляются в изменении формы и размеров кристаллитов. В предлагаемой одномерной модели эти изменения соответствуют изменению расстояния между атомами.

Рассмотрим модель упругого кольца длиной l , массой M и единичной площадью поперечного сечения. Его можно представить как предельный случай системы N частиц (атомов) с массой m и равновесным расстоянием a между ними, которые связаны пружинами

с коэффициентом жесткости γ , при условиях: $N \rightarrow \infty$, $a \rightarrow 0$, $Nm = M$, $Na = l$. Температурная зависимость $\gamma(T)$ определяется с учетом парного потенциала Морзе [5]:

$$\gamma(T) = \gamma_0 \exp(\eta T) (2 \exp \eta T - 1)^*,$$

где γ_0 – потенциал Морзе при низких температурах, $\eta = -\beta\sigma$ a – константа, зависящая от свойств металлов, β – коэффициент теплового линейного расширения, σ – константа Морзе.

Определим величину γ_0 по формуле $\gamma_0 \approx 2\varepsilon\sigma^2$, где ε – энергия связи, которую атом преодолевает при смещении на расстояние a . Это значение γ_0 дает возможность оценить величину γ , исходя из формулы (*) при $T = 1000$ К и равную примерно $0,5 \gamma_0$ при значениях констант, указанных ниже.

Приведенные в работах [6, 7] численные значения величин ε , a , γ_0 , σ и β для различных материалов обеспечивают возможность сделать вывод, что в области температур $T \leq 1000$ К, где ангармонизм имеет существенное значение, имеет место неравенство $\eta T < 1$, которое будет использоваться при решении данной задачи.

В предельном случае уравнение колебаний частиц можно представить как совокупность уравнений дискретной системы. Рассмотрим одномерную цепочку трех соседних частиц. Пусть период такой цепочки равен a , тогда в состоянии равновесия координата n -й частицы цепочки $X_n = na$, а смещение этой частицы из положения равновесия обозначим через U_n при условии: $U_0 = U_N$, $U_{N+1} = U_1$.

Уравнения Ньютона такой системы имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{d^2 U_1}{dt^2} + \gamma(2U_1 - U_2) = 0 \\ m \frac{d^2 U_n}{dt^2} + \gamma(2U_n - U_{n-1} - U_{n+1}) = 0, \quad n = 2, 3, \dots, N-1 \\ m \frac{d^2 U_N}{dt^2} + \gamma(2U_N - U_{N-1}) = 0 \end{array} \right. \quad (30)$$

Ищем решение системы (30) традиционным образом в виде бегущих волн:

$$U_n = C_n e^{i(\omega t - kx)}, \quad (31)$$

где C_n – комплексная амплитуда колебаний n -й частицы, ω – частота колебаний, одинаковая для всех частиц, k – волновой вектор.

После подстановки формулы (31) в (30) получим дисперсионное уравнение (32), связывающее ω_p и k_p [8]:

$$\omega_p^2 = \frac{4\gamma}{m} \sin^2 \frac{k_p a}{2}. \quad (32)$$

Максимальное значение величины ω соответствует минимальному значению λ , которое равно удвоенному периоду решетки металла [9]. Из приведенной таблицы следует, что минимальные значения λ лежат в интервале $\approx 0,5-1,3$ нм.

Таким образом, смещение частиц при колебании одномерной цепочки описывается совокупностью бегущих по кольцу волн (33). Их можно представить как реальную часть от следующего комплексного выражения:

$$U_n^{(p)} = |A| \cos(\omega_p t - k_p X_n + \psi), \quad (33)$$

где ψ – фаза комплексной амплитуды A .

При условии $ka/2 \ll 1$, когда длина волны $\lambda = 2\pi/k \gg a$, $\sin(ka/2) \approx ka/2$ и уравнение (32) в длинноволновом приближении примет вид

$$\omega(k) = ak \sqrt{\frac{\gamma}{m}}. \quad (34)$$

Преобразуем выражение (34), вводя параметр $\rho = mN/aN$ – линейная плотность стержня. Тогда формула (34) примет следующий вид.

$$\omega(k) = k (\gamma a / \rho)^{1/2}. \quad (35)$$

Учтем также тепловое линейное расширение стержня при условии, что его длина много больше, чем радиус поперечного сечения:

$$d l (T) = aN\beta dT = l_0 \beta dT, \quad (36)$$

где l_0 – длина стержня при нуле градусов Кельвина.

Следовательно, такой переход привел к тому, что длинноволновые колебания «не замечают» дискретной структуры цепочки, которая представляется непрерывной упругой средой. Найдем выражение для приведенной полной энергии $E_l = E/l$, воспользовавшись соотношением

$$E_l = \frac{\Pi_{cp}}{v_{gp}}, \quad (37)$$

где Π_{cp} – усредненный поток энергии, v_{gp} – групповая скорость.

По определению среднего потока энергии имеем

$$\Pi_{cp} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \gamma (U_{n-1} - U_n) \frac{\partial U_n}{\partial t} dt. \quad (38)$$

После подстановки уравнения (33) в формулу (38) получим

$$\Pi_{cp} = \frac{1}{2} \gamma |A|^2 ka \omega. \quad (39)$$

По определению групповой скорости имеем

$$v_{gp} = \frac{d\omega}{dk} = a \sqrt{\frac{\gamma}{m}} \cos \frac{ka}{2}. \quad (40)$$

После подстановки формул (39) и (40) в соотношение (37) получим выражение для приведенной полной энергии в длинноволновом приближении:

$$E = \frac{1}{2} |A|^2 k^2 l \gamma a. \quad (41)$$

Чтобы определить усредненную температуру цепочки T , вычислим среднюю энергию колебаний частиц в одномерном приближении с учетом ангармонической добавки:

$$\omega/2\pi \int_0^{2\pi/\omega} \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{m}{2} \left(\frac{dU_n}{dt} \right)^2 + \frac{\gamma U_n^2}{2} \right\} dt = \frac{1}{2} k_0 T, \quad (42)$$

где k_0 – постоянная Больцмана.

После подстановки выражения (33) в формулу (42) будем иметь

$$k_0 T = |A|^2 (\omega^2 M + \gamma). \quad (43)$$

Теперь выражение для энергии примет вид

$$E = (1 + \gamma(T)/M\omega^2) k_0 T / 2. \quad (44)$$

Найдем производную по температуре от этой величины, считая, что величина γ зависит от температуры и выполняется условие $\eta T < 1$. Введем обозначение $C = \gamma_0 / M\omega^2$:

$$E_T = \left\{ \frac{k_0 T}{2(1 + C(1 - \eta T)^2)} \right\}_T. \quad (45)$$

Определим изменение энтропии данной системы S с учетом первого начала термодинамики и выражение для силы, зависящее от температуры:

$$f = l_0 \gamma \beta T, \quad (46)$$

$$dS = \frac{dU + f dl}{T}. \quad (47)$$

Запишем выражение для полной производной от энтропии двумя способами: в первом случае с использованием формулы (47), а во втором – через частные производные от энтропии по температуре и от энтропии по длине. Такой подход имел место в работе [10], но при этом в ней использовалось адиабатическое приближение. В нашем случае имеем

$$dS = \frac{dE}{T} + f \frac{dl}{T}. \quad (48)$$

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right) \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right) dT + \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right) \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right) dT. \quad (49)$$

Сравнивая формулы (48) и (49), получим

$$\left(\frac{\partial S}{\partial E} \right) = \frac{1}{T}. \quad (50)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial l} \right) = \frac{f}{T}. \quad (51)$$

Подставим соотношения (45), (46), (50), (51) в формулу (49) и получим окончательно

$$dS = \left(\frac{k_0 C}{2(1 + C)^2} + l_0^2 \gamma \beta^2 \right) dT. \quad (52)$$

Волновой вектор k_p определяется следующей формулой:

$$k_p = \frac{2p\pi}{Na}, \quad p = 0, 1, \dots, N. \quad (53)$$

Анализ формулы (52) показывает, что основной вклад в увеличение энтропии с ростом температуры дает линейное расширение тел. Одним из способов уменьшить этот рост

является уменьшение коэффициента жесткости. Это может произойти при усилении релаксационных процессов на границах зерен поликристаллических структур. Другой возможностью замедлить рост энтропии является уменьшение коэффициента β . Как известно, на β в значительной мере влияет ангармонизм колебаний атомов, который учитывается в данной модели с помощью потенциала Морзе. В работах [11, 12] приводятся данные по влиянию на модуль упругости, а следовательно, и коэффициент жесткости стали различных способов обработки. Авторы пришли к выводу, что изменить этот параметр термической обработкой и легированием довольно трудно, и на этот счет есть довольно противоречивые мнения. В ряде случаев диффузия примесей приводит к образованию дислокаций, а затем и трещин, а в других – введение примесей способствует стабилизации возникших дислокаций. Холодная прокатка, дающая предпочтительную ориентацию кристаллитам, может улучшить структуру металла. Еще одна возможность повлиять на качество структуры металла – замедлить коэффициент диффузии примесей, который определяется на основе закона Аррениуса, а экспоненциальный множитель в этом законе зависит от энергии активации, которая, в свою очередь, зависит от энтропии.

ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ поведения энтропии от влияющих факторов может служить для оценки изменения остаточных напряжений под действием внешних нагрузок и изменения температуры. Упругая деформация металлов преимущественно приводит к снижению остаточных напряжений. Пластическая деформация вызывает увеличение остаточных напряжений. Аналогично влияет температура. При невысокой температуре, вызывающей упругое удлинение металла, остаточные напряжения могут уменьшаться. С ростом температуры удлинение металлического изделия вызывает пластическую деформацию, и остаточные напряжения могут возрастать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В.А. Термодинамические методы в магнитных явлениях // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2006. № 2. С. 44-49.
2. Кузнецов В.А. Математическое моделирование физических явлений в твердотельных структурах с неоднородным распределением внутренних параметров для разработки приборов с улучшенными характеристиками: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Саратов. гос. техн. ун-т имени Гагарина Ю.А. Саратов, 2015.
3. Кузнецов В.А., Королев А.В. Термодинамические модели термоупругости // Актуальные вопросы естественных и математических наук в современных условиях развития страны: сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. / Инновационный центр развития образования и науки. 2017. С. 21-24.
4. Кузнецов В.А. Динамическая модель термоупругости с учетом ангармонизма колебаний атомов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Физика. 2011. Т. 11. № 1. С. 48-5.
5. Morse P.M. Diatomic molecules according to the wave mechanics // Phys. Rev. 1929. V. 34. P. 57-69.

6. Girifaalco L.A., Weicer V.G. Application of Morse potential function to cubic metals // Phys. Rev. 1959. V. 114. P. 687-695.
7. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1991. 432 с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М., 1965. 203 с.
9. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: Наука, 1978. 616 с.
10. Коротков П.Ф. Молекулярная физика и термодинамика. М.: МФТИ, 2001. 86 с.
11. Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Леонов Б.Н. Легирование и прогноз упругих свойств материалов для широкого диапазона температур // Перспективные материалы. 1998. № 3. С. 11-18.
12. Лысак Л.И., Николин Б.И. Физические основы термической обработки стали. Киев: Техніка, 1975. 327 с.
13. Грушин И.А., Герман М.А. Механизм формирования внутренних напряжений в образцах из титанового сплава, полученных при помощи аддитивного производства // Молодежь и будущее авиации и космонавтики: аннотации конкурсных работ 11 Всерос. межотраслевого молодежного конкурса науч.-техн. работ и проектов. М.: МАИ, 2019. С. 215-216.
14. Моделирование распределения остаточных напряжений в сварном соединении / Е.Е. Абашкин, А.А. Буренин, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.В. Ткачёва // Физика и механика материалов. 2019. Т. 42. № 5. С. 671-689.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Владимир Александрович – доктор физико-математических наук, профессор Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова

Vladimir A. Kuznetsov – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Saratov State Vavilov Agrarian University

Королев Альберт Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Albert V. Korolev – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Control Systems and Technologies in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.06.20, принята к опубликованию 17.08.20

А.А. Перегородов

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Аннотация. Выполнен обзор существующих полимерных композиций и материалов, используемых для изготовления неметаллических подшипников качения. Рассмотрены технологии получения и использования новых материалов для изготовления как деталей подшипников, так и подшипников качения из полимерных материалов, показаны как их основные преимущества по сравнению с подшипниками из металла, так и недостатки.

Ключевые слова: подшипник качения, полимерные композиции, инженерные пластики

A.A. Peregorodov

SPECIFICS OF POLYMERIC MATERIALS APPLIED IN NON-METALLIC ROLLER BEARINGS

Abstract. The article presents a review of polymer composites and materials used in manufacturing non-metallic roller bearings. The technologies applied for the design and application of advanced materials in manufacturing components to the bearings and roller bearings from polymeric materials are considered. The main advantages and disadvantages of these materials, compared to the bearings made of metal, are demonstrated.

Keywords: roller bearing, polymer composition, engineering plastics

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время материалы, основой которых являются синтетические или природные высокомолекулярные соединения, являются одними из наиболее востребованных в мире, чему сопутствует ряд факторов, среди которых достаточно низкая стоимость, высокая пластичность и податливость к обработке.

Применяя такие материалы в производственных целях, отечественная и мировая промышленность создает всевозможные изделия, которые могут использоваться для решения самого широкого спектра задач.

Безусловно, развитие материаловедческих разработок в области полимерных композиций не могло не затронуть такую отрасль, как машиностроение, которая представляет собой синтез достижений различных научных сфер как теоретического, так и практико-прикладного характера.

Результаты «индустрии пластмасс» внедряются в наиболее прогрессивные технологии производства разнообразной по назначению и принципу действия продукции машиностроительного комплекса новейшего поколения наряду с такими постоянно развивающимися направлениями в машиностроении, как совершенствование высокоточного многокоординатного оборудования с ЧПУ, разработка высокостойкого режущего инструмента, позволяющего вести обработку твердых и сверхтвердых материалов, поиск новых материалов, сплавов и т. д.

Сегодня полимеры и методы их обработки играют ключевую роль в стратегиях развития авиационной, космической, автомобильной промышленности, направленных на решение главенствующих задач, например снижение минимальной массы своих изделий, которое напрямую влияет на эксплуатационные характеристики изделий, улучшение экономических и экологических показателей. Вопрос достижения этих целей особенно актуален в подшипникостроении.

Причина кроется в постоянном наращивании объемов мирового производства изделий на предприятиях станкостроения, энергетического машиностроения и др., где идет постоянная борьба между крупнейшими производителями подшипников за предложение потребителям качественно новых продуктов, в число которых входят гибридные подшипники и подшипниковые узлы, подшипники из композиционных неметаллических материалов. Именно это дает новые дополнительные векторы развития мировому научному сообществу, работающему в этой сфере.

Подшипники качения являются ответственными узлами трения, работа которых влияет на эксплуатационные свойства машины в целом [4]. Долговечность подшипников зависит от параметров воспринимаемого нагружения, способа смазки и работы внешних сил, но материал и конструктивные решения компоновки подшипника являются определяющими в стойкости подшипника, и зачастую именно полимеры в определенных условиях применения имеют ряд преимуществ в плане наработки на отказ и общей работоспособности перед традиционно используемыми в подшипниках качения сплавами цветных металлов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Технологии производства композитных пластиковых подшипников объединяют большое разнообразие полимерных материалов, их фиброармирование, использование жидких и твердых смазок, пропитки и другие вещества для специальных решений. Работки и исследования в области поиска наиболее рациональных полимерных соединений ведутся с середины прошлого столетия [1]. Именно в эти годы ученым-химиком Роем Планкеттом был открыт материал с химической формулой $(CF_2-CF_2)_n$, называемый «Фторопласт» (Тефлон), патент на который получила фирма Kinetic Chemicals. Полимер тетрафторэтилена обладает редкими физическими и химическими свойствами, среди которых хладотекучесть и низкая теплопроводность, также он не поглощает воду, нефтепродукты и другие жидкости. Для улучшения ряда характеристик внедряются наполнители, в качестве которых могут выступать графит, медный порошок, дисульфид молибдена, двуокись титана, повышающие коэффициент трения, теплопроводность, несколько снижающие хладотекучесть [2].

Наряду с важными отличительными характеристиками эта полимерная композиция имеет и серьезные недостатки. Фторопласт-4 дает большую усадку – от 4 до 7%, его невозможно склеивать или сваривать, а отходы после его механической обработки нельзя использовать без деполимеризации. Армирование фторопласта – технологически сложный процесс и вследствие этого не всегда эффективный. А процесс получения материала, в том числе и методами взрывной обработки – технологического приема воздействия на полимерные материалы, предполагает необходимость в специальных мерах для защиты людей при его переработке и изготовлении изделий [3]. Ввиду высокой стоимости и трудоемкой технологии переработки фторопласт-4 имеет узкую область применения, в основном для химического машиностроения. Чаще этот материал используют для пропитки пористых подшипников и в качестве компонента антифрикционных композиций.

Немецким химиком Германом Стаудингером еще в 1938 году были синтезированы полиформальдегиды – высокомолекулярные термостабильные полимеры с веществом-стабилизатором, обладающие такими важными преимущественными свойствами, как высокие антифрикционные и физико-механические показатели в сочетании с хорошими диэлектрическими характеристиками.

На сегодняшний день существует группа материалов, сферы применения которых разделены в зависимости от эксплуатационных условий. Например, в условиях высоких скоростей, нагрузок и температуры используются такие составы, как TECATRON PVX (PPS + GR + PTFE + CF) [5]. Это полифениленсульфид с добавлением 10% фторопласта-4, 10% углеволокна и 10% графита. Он обладает высокой жесткостью и прочностью, стойкий к истиранию и применяется там, где не справляются инженерные пластики на основе полиамидов, полиацетала или полиэтилентерефталата, например в подшипниках, воспринимающих высокие нагрузки при скоростях свыше 20 000 оборотов в минуту. Этот химически стойкий материал может быть использован там, где металл под воздействием, например, внутриконденсационных процессов, а следовательно, коррозии и фреттинг-коррозии, разрушается. Но, несмотря на его химическую инертность, он имеет существенный недостаток, ограничивающий сферы применения, – TECATRON PVX запрещен для контакта с пищевыми продуктами.

Улучшенным составом по сравнению с вышерассмотренной композицией является ТЕСАРЕЕК PVX (РЕЕК + GR + PTFE + CF). Это полиэфирэфиркетон с добавлением 10% фторопласта-4, 10% углеволокна и 10% графита. ТЕСАРЕЕК PVX – более температуростойкий и устойчивый к износу полимер, обладающий высокой стойкостью к агрессивным реагентам, сравнимой с PTFE.

Он имеет отличные свойства скольжения и может использоваться даже в условиях сухого трения, что позволяет использовать этот материал для подшипниковых изделий, работающих при высоких скоростях и нагрузках, где остальные полимеры имеют меньшие предельно допустимые режимы эксплуатации в трибосопряжении. По комплексным характеристикам он уступает только серии TECASINT и ТЕСАРЕЕК XP-280 в части температурных и механических свойств.

Полиэфирэфиркетон с повышенным добавлением углеволокна (до 30%) называется ТЕСАРЕЕК CF30 (РЕЕК + CF). Этот состав сравним с ТЕСАРЕЕК PVX, но несколько

уступает ему по износостойкости и коэффициенту трения. Он имеет более твердую и прочную структуру и превосходит ТЕСАРЕЕК PVX по температуре тепловой деформации, которая составляет +341°С против +277°С у ТЕСАРЕЕК PVX.

Для работы в условиях трения-скольжения в пищевом оборудовании, в узлах, работающих с температуры более +200°С, разработана модификация с добавлением фторопласта-4, которая называется ТЕСАРЕЕК TF10 (РЕЕК + РТФЕ).

В условиях низких скоростей, умеренных нагрузок и температур применяются такие составы, как ТЕСАFLON (РТФЕ). Это самый скользкий и химически стойкий полимер. В чистом виде в опорах скольжения используется все реже, так как обладает низкой стойкостью к износу и плохой стабильностью размеров под нагрузкой (высокая ползучесть), чаще используется в соединении с углеволокном как антифрикционная присадка (модификатор) к другим полимерам. ТЕСАFLON CF30 (РТФЕ + CF) – армированный углеволокном на треть от общего состава РТФЕ. Обладает большей жесткостью и износостойкостью по сравнению с ненаполненным РТФЕ. Значительно увеличена стойкость к ползучести.

Еще одна инженерная полимерная композиция для низких нагрузок и скоростей при температуре в узле свыше +150°С имеет название ТЕСАРЕТ TF (РЕТ + РТФЕ). Так как в ТЕСАРЕТ TF введен фторопласт, достигнуты улучшенные свойства скольжения и повышенная стойкость к износу в сравнении с ненаполненными ТЕСАРЕТ или ТЕСАFORM АН/АD. Разрешен для контакта с пищевыми продуктами, поэтому активно применяется в узлах.

При малых скоростях и низких температурах также применяются инженерные полиамиды ТЕСАМID и ТЕСАСТ (РА6, РА66, РА6С) – экономичные, универсальные конструкционные полимеры, которые широко используются во многих сферах машиностроения и при ремонтных работах. Характерные особенности полиамидов – это их высокая прочность, износостойкость и устойчивость к ударным нагрузкам, поглощение (демпфирование) ударов. Материалы обладают свойством впитывать в себя влагу, что ведет к некоторой потере механических характеристик и к изменению геометрических размеров (увеличение объема); устойчивы к маслам, углеводородам и топливу; в сухих условиях обладают относительно высоким коэффициентом трения ($\mu = 0,4$) в сравнении с другими антифрикционными материалами.

РА66 присущи повышенные механические характеристики в сравнении с РА6. ТЕСАМID 6 МО, ТЕСАСТ МО (РА6 + МоS₂) – модификации полиамида РА6, РА6С с добавлением порошка дисульфида молибдена. Данное включение повышает твердость, прочность и износостойкость в сравнении с ненаполненной композицией. Используется в конструкциях даже в условиях повышенной загрязненности, ударных нагрузок и вибрации. Применяется в основном в грубых механизмах, где неважна большая точность изделий (к примеру, направляющие стрел подъемных кранов, скользящие элементы погрузчиков, втулки и подшипники скольжения при невысокой окружной скорости до 1,5 м/с).

К этой категории относится и ТЕСАСТ L (РА6 + oil) – маслonaполненный полиамид, также используется для пар трения-скольжения, но в большей степени в направляющих, подвергающихся ударным нагрузкам. Обладает хорошим скольжением и ан-

тиадгезионными свойствами (антисхватывание). При работе выделяет на поверхность трения жидкую смазку (масло), обеспечивая близкие к граничному трению условия. Со смазками работает и TECAGLIDE (РА6С + твердая смазка). Антифрикционный инженерный материал премиум-класса на основе полиамида с добавлением твердого смазочного материала. Обладает наивысшей износостойкостью среди полиамидных материалов, применяется при повышенных скоростях в сравнении с базовыми марками полиамидов.

Таким образом, современное подшипникостроение, безусловно, активно применяет полимерные композиции, которые имеют преимущества перед стальными сплавами по весовым характеристикам, стойкости к коррозии и химическому воздействию, обладают пониженными звуковыми и вибрационными показателями, хорошими демпфирующими свойствами. Низкая шероховатость термопластиков помогает снизить энергозатраты за счет снижения трения и тепловых потерь. Но наряду с весьма убедительными преимуществами существует ряд недостатков, который формирует новые горизонты исследований перед учеными всего мира.

Термопластические пластмассы (полиамиды, фторопласт) под нагрузкой подвержены ползучести и могут выдавливаться. Эти же материалы имеют низкую теплопроводность, что еще больше содействует их ползучести от повышения температуры в узле трения. Вместе с тем следует отметить, что применение антифрикционных пластиков ограничено по причине работоспособности в сравнительно малонагруженных с металлическими подшипниками узлах трения – при небольших давлениях и невысоких скоростях. Выход из строя полимерных подшипников обычно связан с повышением температуры на поверхностях трения, при этом, например, реактопласты обугливаются, а термопласты оплавляются и текут. Применяя пластмассы в узлах трения, следует учитывать их значительное тепловое расширение, весьма высокую податливость (низкий модуль упругости, в особенности у термопластмасс), старение полиамидов и других пластмасс, приводящее, в частности, к их охрупчиванию.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенный обзор полимерных композиций, применяемых при изготовлении подшипников, составляющих основу подвижных узлов медицинских аппаратов, фармацевтического, измерительного оборудования, устройств для пищевой промышленности, сферы химических и гальванических покрытий, свидетельствует об огромном потенциале развития их применения в самых различных областях науки и техники.

Задачами, над которыми необходимо работать для повышения конкурентоспособности неметаллических подшипников, являются повышение их грузоподъемности, долговечности, износо- и термостойкости, ползучести и других характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые материалы в машиностроении / под ред. Л.Я. Попилова. Л.: Машиностроение, 1967. 428 с.

Машиностроение и машиноведение

2. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Триботехника: краткий курс. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008. 344 с.

3. Агафонова Г.В. Формирование структуры и свойств композиционных материалов аропласта с фторопластом-4 при взрывном прессовании и получение антифрикционных изделий: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01/ Агафонова Галина Викторовна. Волгоград, 2009. 125 с.

4. Игнатъева С.С., Игнатъев С.А. Методические аспекты управления факторами качества в производстве подшипников // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. № 2 (79). С 49-52.

5. <https://www.polimer1.ru/>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Перегородов Алексей Аркадьевич – магистрант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksey A. Peregorodov – Master Student, Department of Control Systems and Technologies in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 27.07.20, принята к опубликованию 17.08.20

Д.Ю. Финогеев, О.П. Решетникова

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СОВРЕМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ
ДЕТАЛЕЙ ТОЧНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Аннотация. В статье рассмотрены наиболее востребованные технологии аддитивного производства деталей предприятиями точного машиностроения. Описаны экономико-статистические данные рынка аддитивных технологий в мире.

Ключевые слова: аддитивные технологии, аддитивное производство, трехмерная печать (3D-печать)

D.Yu. Finogeev, O.P. Reshetnikova

**ADDITIVE TECHNOLOGIES
IN MODERN PRODUCTION OF PRECISION
MACHINE BUILDING PARTS**

Abstract. The article considers the most popular technologies for additive production of parts by precision engineering enterprises. Economic and statistical data of the market of additive technologies in the world are described.

Keywords: additive technologies, additive manufacturing, 3D printing

ВВЕДЕНИЕ

Появление «трехмерной печати» и широкое распространение цифровых технологий способствовали становлению аддитивных технологий в различных областях промышленности. На сегодняшний день данные технологии выходят на пик своего развития. Ученые проводят множество исследований по совершенствованию технологий аддитивного производства (АП). Разрабатываются международные стандарты.

Растущее применение аддитивных технологий по сравнению с устоявшимися методами объясняется рядом преимуществ:

- изготовление объектов (деталей) сложной геометрии с высокой точностью;
- высокая экономия материала;
- большой выбор материалов;
- высокая повторяемость деталей;
- получение более легких конструкций без потери прочностных характеристик;
- экономия производственных мощностей.

Применение аддитивных технологий получило наиболее широкое распространение в промышленных и исследовательских отраслях. Возможности технологии АП востребованы на всех этапах производства детали, начиная с создания прототипов готовых деталей или изделий и заканчивая ремонтом конкретных узлов оборудования.

КЛАССИФИКАЦИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В настоящее время выпущен ряд международных стандартов, устанавливающих терминологию и определения, общие принципы применительно к деталям, получаемым методом АП, требования к материалам, контроль качества и т. д.

Данные стандарты разработаны техническим комитетом F42, состоящим более чем из 600 экспертов из 25 стран мира, созданным совместно двумя организациями: «ASTM International» (*American Society of Testing Materials*) и «ISO» (*International Organization for Standardization*).

Так, комитет сформировал классификацию аддитивных технологий, состоящую из 7 групп (таблица) [1]:

1. Material extrusion – выдавливание материала;
2. Material Jetting – разбрызгивание материала, струйные технологии;
3. Binder jetting – разбрызгивание связующего;
4. Sheet lamination – соединение листовых материалов;
5. Vat photopolymerization – фотополимеризация в ванне;
6. Powder bed fusion – расплавление материала в заранее сформированном слое;
7. Directed energy deposition – прямой подвод энергии непосредственно в место построения.

Классификация аддитивных технологий ISO / ASTM52900-15[1]

| Группа | Технология | Исходный материал | Источник энергии | Особенности |
|--------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|--|
| Material Extrusion | Fused Deposition Modeling (FDM) | Термопластики, керамические суспензии, металлические пасты | Термическая энергия | Невысокая стоимость установок; использование нескольких материалов |
| | Contour Crafting | | | |
| Material Jetting | Polyjet/Inkjet Printing | Фотополимеры, воск | Термическая энергия/фотоотверждение | Печать из различных материалов; высокое качество поверхности |
| Binder Jetting | Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP) | Полимерные порошки, керамические порошки, металлические порошки | Термическая энергия | Необходимость пропитки изделий после их построения; широкий выбор материалов; высокая пористость изделий |
| Sheet Lamination | Laminated Object Manufacturing | Металлические листы, полимерные пленки, | Лазерный луч | Высокое качество поверхности; необходи- |

| Группа | Технология | Исходный материал | Источник энергии | Особенности |
|----------------------------|--|---|-------------------------------|--|
| | (LOM) | керамические ленты | | мощь удаления остатков материала |
| Vat Photopolymerization | Stereolithography (SLA) | Фотополимеры, керамики (оксиды Al, Zr, пьезокерамики) | Ультрафиолетовый лазер | Высокая скорость построения; высокая точность изготовления; высокая стоимость исходных материалов |
| Powder Bed Fusion | Selective Laser Sintering (SLS) | Полиамиды, полимеры | Лазерный луч | Высокая точность изготовления; высокая плотность изделий; использование поддержек |
| | Direct Metal Laser Sintering (DMLS) | Металлические и керамические порошки | | |
| | Selective Laser Melting (SLM) | | | |
| | Electron Beam Melting (EBM) | | Электронный луч | |
| Directed Energy Deposition | Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electron Beam Welding (EBW) | Металлические порошки и проволоки | Лазерный луч, электронный луч | Возможность ремонта изделий; создание функционально-градиентных изделий; низкое качество поверхности |

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЫНКА АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Журнал *Wohlers Report* приводит данные о рынке технологий АП по всему миру, так за 2019 год рынок индустрии составил \$11,867 млрд, что по сравнению с прошлым годом больше на 21,2% [2]. Суммарные затраты производителей оборудования на новые разработки и расходы на НИОКР составили 38,6 % от доходов за 2019 года, что по сравнению с 2018 годом больше 10 % [2]. Представленные экономические показатели демонстрируют востребованность аддитивных технологий на рынке.

По опросу французской компании *Sculpteo* [3] респондентов машиностроительного сектора, в 2020 году 68 % стремятся использовать АП для решения большего круга задач в рамках своего производства, 44 % стремятся внедрять технологии за счет использования аутсорсинга. Это позволяет компаниям сократить расходы на обслуживание оборудования, а сэкономленные средства направить на финансирование исследований новых технологий. В опросе приняли участие 1600 респондентов из 71 страны.

Статистика, приведенная после опроса, показала наиболее используемые технологии АП среди машиностроительных предприятий. Рейтинг используемого оборудования популярных методов получения изделий представлен на рис. 1.

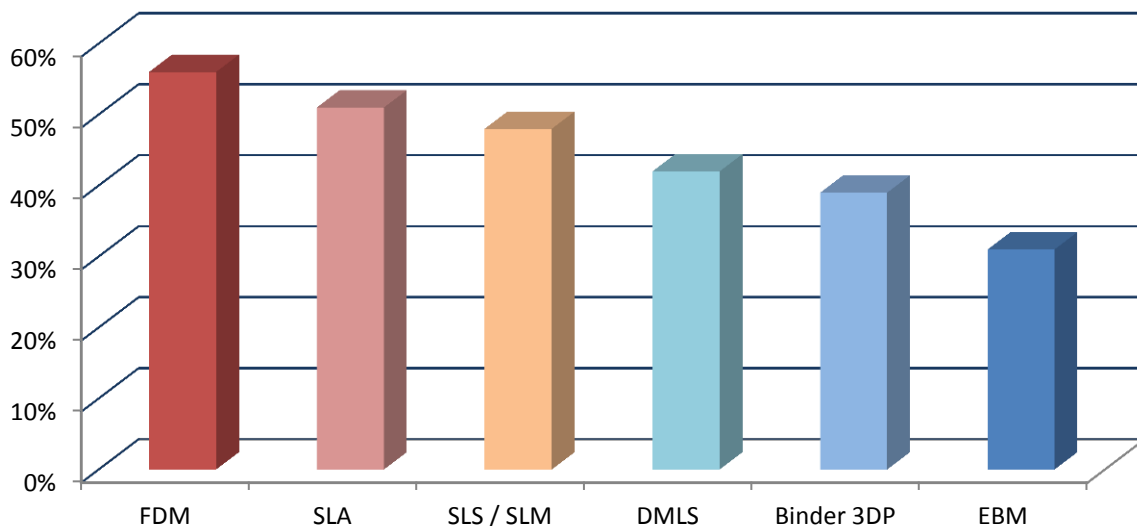


Рис. 1. Диаграмма использования оборудования технологий АП

МЕТОДЫ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Исходя из статистики, приведенной выше, рассмотрим наиболее востребованные методы АП среди предприятий точного машиностроения.

«FDM» **Моделирование методом наплавления** (Fused Deposition Modeling) – технология, основанная на методе построения деталей (объектов) путем послойного наплавления термопластичных материалов. Деталь формируется на специальной адгезивной подложке, которая является областью построения. Материал (filament) для печати подается через экструдер, состоящий из привода подачи (feeder) и калибрующего элемента – сопла разных диаметров (рис. 2).

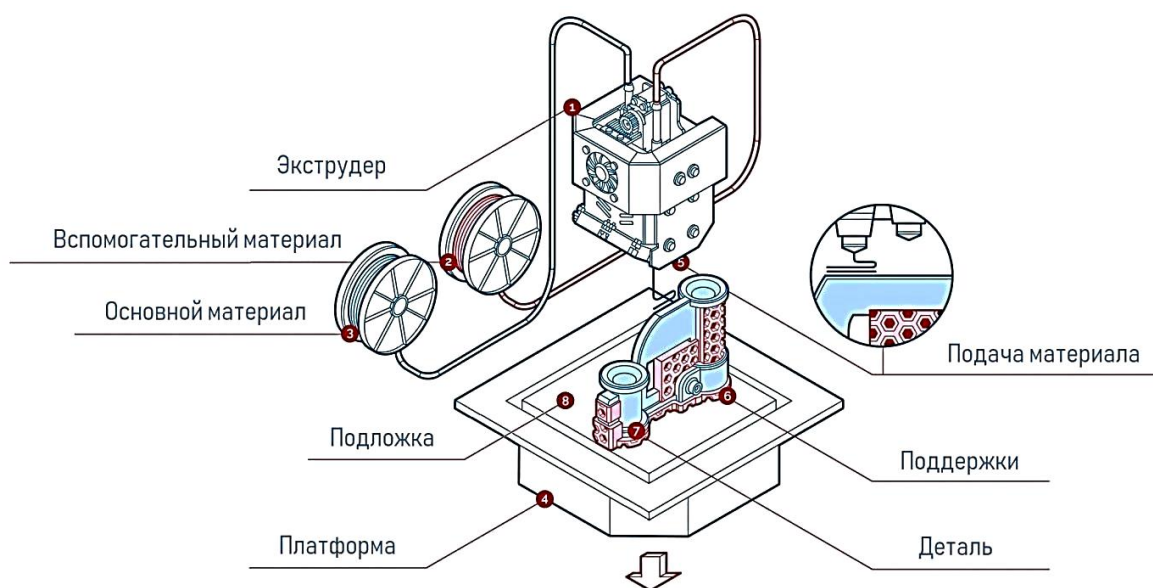


Рис. 2. Схема моделирования детали методом «FDM»

В качестве материалов используются всевозможные термопластичные пластики (PLA, ABS, PETG, NYLON, TPU и т. д.) и композиционные полимеры, которые бывают в виде калиброванных нитей, пасты и суспензии. Детали, получаемые с помощью печати, могут быть разными по своим характеристикам: твердыми, эластичными, износостойкими, термостойкими и т. д. Точность получаемой модели и технические характеристики напрямую зависят от материала, из которого производится построение детали. Толщина получаемого слоя от 0,3 до 0,6 мм и отклонения формы от 0,08 до 0,5 мм [4]. Некоторые принтеры позволяют печатать комбинированно. Например, печать двумя цветами или двумя разными пластиками (мягкий – твердый). Моделирование двумя материалами позволяет построить деталь с растворимыми поддержками. В этом случае в качестве второго пластика (вспомогательного) используют растворимый материал типа PVA, HIPS. Он удаляется в воде или специальной жидкости, что позволяет получить высокое качество поверхности детали и исключить постобработку.

Оборудование, работающее по технологии наплавления, приобрело большую популярность у производственных и научных организаций. Это обусловлено доступностью оборудования для печати и большим выбором материала. Также предприятия автомобильной, авиационной, аэрокосмической и других отраслей очень часто используют оборудование «FDM» в качестве «помощника» в проектировании. 3D принтер позволяет выполнить быстрое прототипирование деталей (узлов), что позволяет оптимизировать выполнение конструкторских и технологических задач.

«SLA» **Лазерная стереолитография** (Stereolithography) – технология фотополимеризации, является самой первой из всех видов аддитивных технологий. Принтер, работающий на основе метода стереолитографии, выращивает трехмерную модель посредством нанесения фотополимеризующегося материала на подвижную платформу (рис. 3).

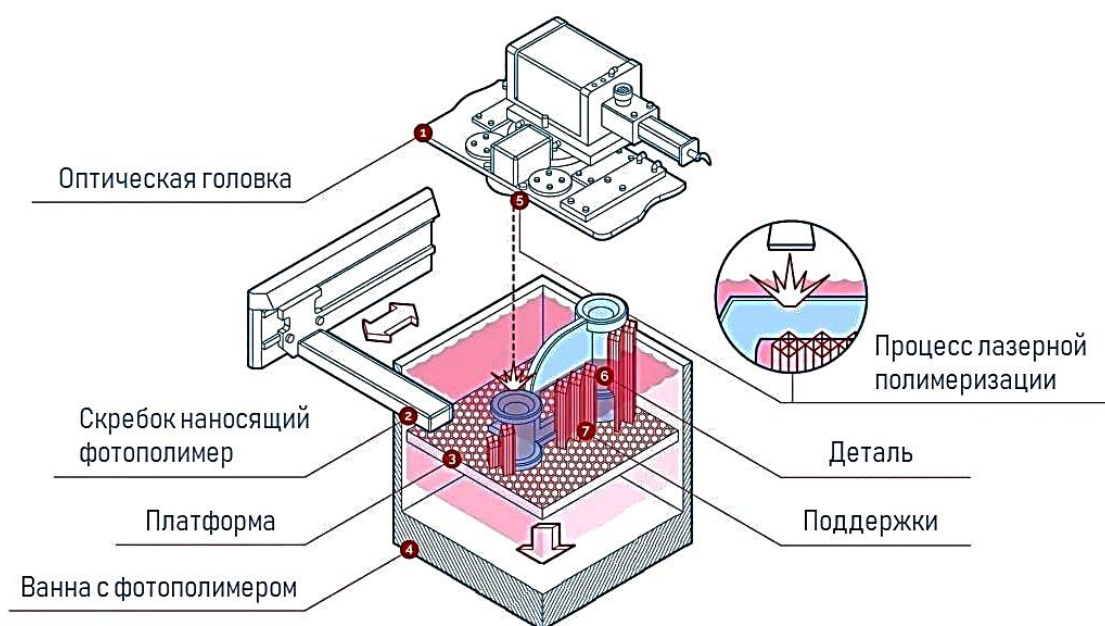


Рис. 3. Схема выращивания детали методом стереолитографии

Изобрел и запатентовал эту технологию в 1983 г. американец Чарльз Хал (Charles Hull) [5]. Технология фотополимеризации позволяет получать высокоточные детали сложной формы без постобработки. Это достигается малой толщиной наносимого слоя (от 10 микрон), и свойств отверждаемого материала. Соответственно и шероховатость получаемых поверхностей очень низкая ($Ra\ 0.02 - 0.08$).

Оборудования данного класса внедряется на предприятиях, производящих высокоточные детали [6]. Фотополимерные материалы позволяют получать как готовые, так и промежуточные изделия производства. Например, технологией SLA можно получить: высокоточную мастер-модель детали для литья, тонкостенные корпусные детали микроприборов, мембраны (клапана) высокой точности.

Технология, до сих пор является очень перспективной. Постоянные разработки новых фотополимерных материалов позволяет получать больше деталей с разными техническими характеристиками.

«SLS/SLM» Селективное лазерное спекание/сплавление (Selective Laser Sintering/Melting) – технология метода заключается в спекании мелкодисперсного порошкового (керамического, полиамидного, ВЮ-совместимого, металлического) материала с помощью лазера (рис. 4).

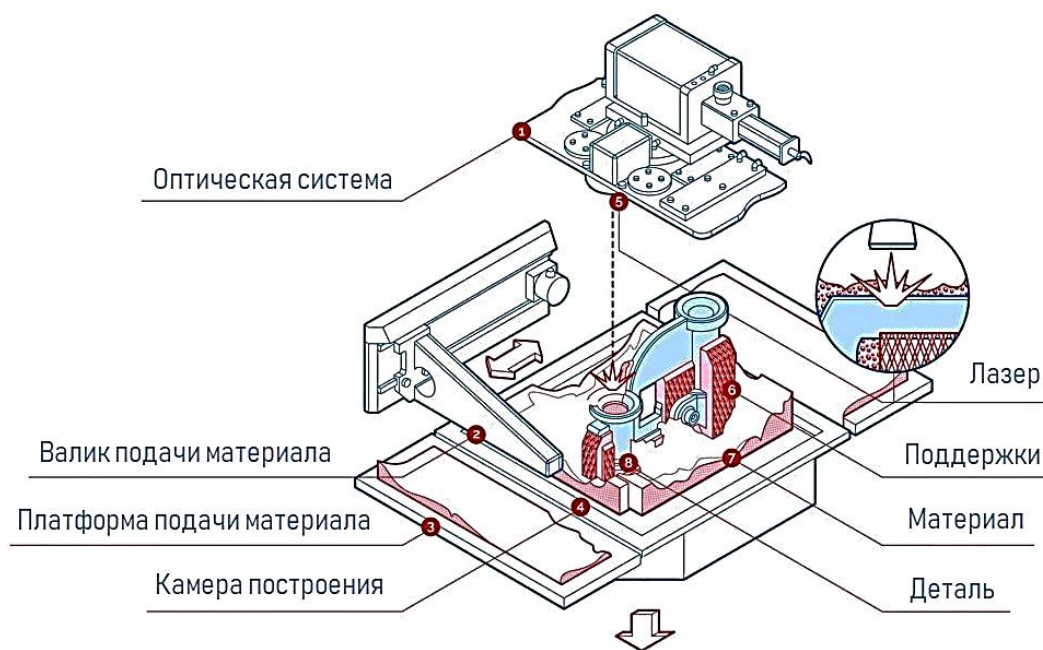


Рис. 4. Схема построения детали методом селективного спекания

Процесс селективного лазерного спекания (сплавления), начинается с разогрева материала до температуры, близкой к плавлению, порошок подается в камеру построения и разравнивается валиком на толщину минимального слоя материала. Затем лазерный луч спекает слои порошка в необходимых участках по сечению слоя создаваемой детали, после чего происходит подача новой порции материала валиком, параллельно камера построения опускается на величину слоя. Цикл повторяется до полного построения детали.

Технология селективного лазерного спекания (плавления) позволяет получить высокоточные детали сложной геометрии, которые невозможно произвести традиционными методами. Точность объекта после печати в зависимости от используемого материала и пятна лазера составляет $\pm 0,05 - 0,1$ мм, шероховатость от Rz 30 – 50 мкм [7].

Изделия, созданные методом «SLS/SLM», имеют превосходные механические свойства: прочность, гибкость, высокую детализацию. Из минусов все произведенные детали требуют термической и механической постобработки [11].

«DMLS» Прямое лазерное спекание металлов (Direct Metal Laser Sintering) – технология функционально одинакова с «SLM». Главным отличие «DMLS» от «SLM» сводится к процессу связывания металлических частиц.

1. «DMLS» использует металлические сплавы порошков с низкой температурой плавления, частицы материала спекаются между собой, не переходя в жидкую фазу.

2. Процесс термонагрева камеры построения не столь агрессивен, как при печати методом плавления.

3. При построении методом прямого спекания не возникнут внутренним напряжениям, так как при печати не происходит резкого перепада температур, как в технологии «SLM».

Из минусов: лазерное спекание уступает по запасу прочности и монолитности технологии селективного плавления металла.

«Binder 3DP» Струйное нанесение связующего (Indirect Inkjet Printing) – технология послойного нанесения связующего на порошковый материал. Кинематика движения частей станка схожа с методами «SLS/SLM».

Камера построения опускается при каждом слое, а валик наносит слой, затем печатающая головка наносит связующее. Толщина слоя от 50 до 100 микрон, материалом выступают песок, керамика и некоторые виды пластика.

Усадка после производства изделия составляет от 0,8 до 2% [8, 9]. Технология позволяет печатать изделия сложной формы из песчаных материалов, без последующей трудоемкой обработки.

Применение данной технологии распространено в автомобильной и авиационной промышленности. С помощью неё изготавливают формы для литья точных заготовок под давлением. Метод позволяет ускорить технологический процесс производства литьевых форм. Стандартный метод – от проектирования до производства – может занимать от 2 недель до месяца, а аддитивное производство позволяет получить готовую форму за 2-3 дня. Это большая экономия для производства не только по времени, но и по экономическим затратам на производство.

«EBM» Электронно-лучевая плавка (Electron Beam Melting) – метод аддитивного производства изделий из металла. «EBM» схожа с селективным лазерным плавлением, но главное отличие заключается в использовании электронных излучателей (электронных пушек) вместо лазеров в качестве источников энергии (рис. 5). Технология позволяет производить детали высокой плотности и прочности.

Плавка материала производится в вакуумных камерах построения с использованием мощного излучателя, который позволяет работать с материалами, чувствительными к окислению, например с чистым титаном или алюминием.

Технология получила применение в аэрокосмической отрасли. Она позволяет производить высокоточные детали реактивных и ракетных двигателей, несущих элементов конструкций летательных аппаратов [10].

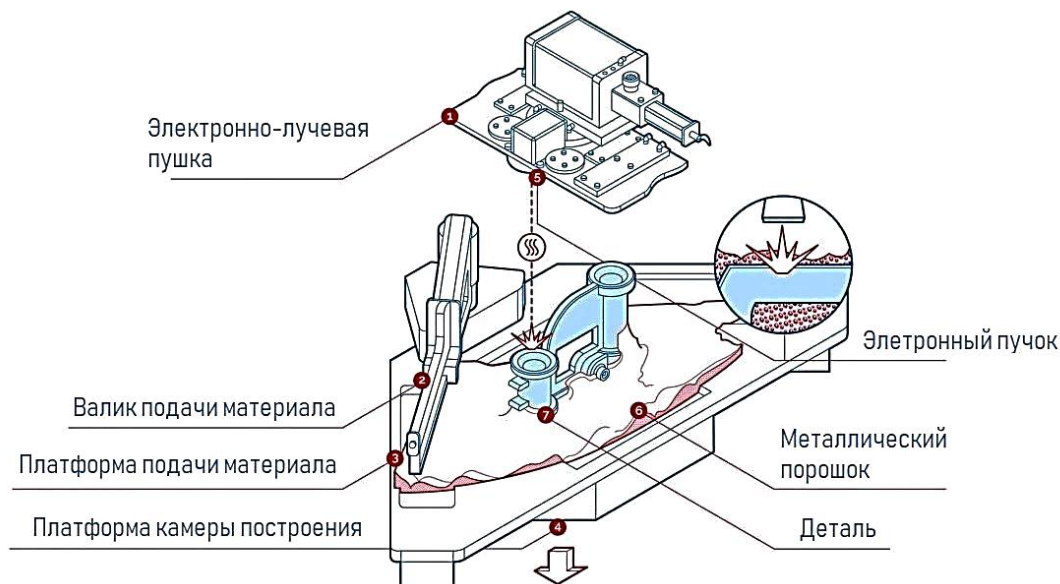


Рис. 5. Схема построения детали методом селективного спекания

Электронно-лучевая плавка не требует последующей термообработки. Также не требует и механической обработки, так как высокая плотность электронного луча позволяет печатать деталь с хорошей точностью $\pm 0,05 - 0,2$ мм.

Низкий коэффициент спроса на оборудование электронно-лучевой плавки обусловлен высокой стоимостью относительно других схожих методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение АП позволяет с высокой эффективностью получать детали нормальной и высокой точности в очень короткие сроки. Представленные технологии позволяют улучшать качество производственных технологических процессов путем снижения трудоемкости, повышения качества продукции, снижения расходов и повышения экологичности, что впоследствии позволяет снизить затраты и повысить эффективность работы производства на предприятии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO / ASTM52900-15, Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, [Электронный ресурс] URL: www.astm.org (дата обращения 29.10.2020).

2. 3D printing and additive manufacturing industry status, Wohlers Report, Inc., 2020 [Электронный ресурс] URL: <https://wohlersassociates.com/2020report.htm>. Имеется печатный аналог.

3. The State of 3D printing, 6th edition of the largest study of the Additive Manufacturing industry, Sculpteo, 2020 [Электронный ресурс] URL: <https://www.sculpteo.com/en/ebooks/state-of-3d-printing-report-2020/> (дата обращения 29.10.2020).
4. Зеленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении // пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
5. Lipson H., Kurman M. Fabricated: The new world of 3D printing. John Wiley & Sons Limited, 2013. 320 с.
6. Лазерная стереолитография: состояние и перспективы / С.В. Камаев, М.А. Марков, А.Н. Никитин, М.М. Новиков // Аддитивные технологии. 2018. № 4. С. 44-48.
7. Раевский Е.В., Цыганкова А.Л. Технология лазерного спекания металла вышла на новый уровень промышленного применения // Аддитивные технологии. 2016. № 1. С. 13-15.
8. Рихарев М. Цифровая аддитивная линейка // Аддитивные технологии. 2020. № 3. С. 18-26.
9. Бычковский Д.Н., Неткачев А.Г. Производство литейных форм методом послойной печати // Аддитивные технологии. 2018. № 4. С. 12-15.
10. Boissonneault T. Metal AM Focus 2020 // Additive manufacturing industry: metal. 3D Printing Media Network, 2020. 27 с.
11. Злобина И.В., Бекренев Н.В. Исследование влияния ультразвуковой пропитки на физико-механические характеристики армированных углеродными волокнами полимерных композиционных материалов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 2 (85). С. 72-78.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Финогеев Даниил Юрьевич – студент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Daniil Yu. Finogeev – student, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Решетникова Ольга Павловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olga P. Reshetnikova – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.385

И.П. Мельникова, Т.Ю. Семина, О.А. Андреева, А.А. Фомин

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АНТИЭМИССИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КАТОДНО-СЕТОЧНЫХ УЗЛОВ

Аннотация. Показана взаимосвязь появления токов утечки при эксплуатации катодно-сеточных узлов между катодом и управляющей сеткой из гафниевой фольги со структурной неустойчивостью гафния при рабочих температурах сетки. Экспериментально доказана возможность получения катодно-сеточных узлов с повышенной долговечностью не менее чем в 2 раза при использовании для изготовления сеток сплава ВЦУН10-1, обладающего прочностью при рабочей температуре катода в 4 раза выше, чем у гафния.

Ключевые слова: катодно-сеточный узел, прочность, термоэмиссионный ток, рентгеноструктурный анализ, сетка, ток утечки

I.P. Melnikova, T.Yu. Semina, O.A. Andreeva, A.A. Fomin

ADVANCED ANTI-EMISSION MATERIALS FOR CATHODE-GRID NODES

Abstract. The article demonstrates the relationship between a possibility of the leakage currents, while the cathode-grid nodes are in operation, between the cathode and the control grid made of hafnium foil characterized for structural instability of hafnium at the working temperatures of the grid. It has been experimentally proved that there is a possibility to obtain the cathode-grid nodes with an enhanced durability level by 2 times higher when using the VZrCNb10-1 alloy for grid fabrication, with the strength characteristics, under the working temperature of the cathode, 4 times higher compared to hafnium.

Keywords: cathode-grid node, strength, thermionic current, X-ray structural analysis, grid, leakage current

ВВЕДЕНИЕ

При разработке СВЧ приборов с сеточным управлением повышенной выходной мощности одной из сложных задач является выбор материала для изготовления теневой и управляющей сеток. Катоды таких приборов имеют высокую рабочую температуру (~1100°C) и, как следствие, интенсивный перенос активного вещества с катода на теневую и управляю-

щую сетки. В результате изменения физико-механических свойств материала сеток в процессе срока службы и их тепловых деформаций пушка теряет управление по сеткам.

Известно, что для изготовления сеточных электродов наиболее часто применяют гафний. Этот материал обладает хорошими антиэмиссионными свойствами. Однако он имеет недостаточную жаропрочность при работе в условиях повышенных температур [1-3].

Возрастающие требования к эксплуатационным характеристикам материалов с антиэмиссионными свойствами объясняют необходимость проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку новых материалов. Таким образом, создание новых антиэмиссионных материалов и методов, которые повышают термическую устойчивость сеточных электродов, является актуальным.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования фольга испытывалась на растяжение согласно ГОСТ 11701-66 при комнатной температуре и ГОСТ 9651-84 при повышенных температурах (800-1100°C). Параметры образцов: рабочая длина – 60 мм, расчетная длина – 40 мм, скорость передвижения подвижного захвата – 10 мм/мин. Испытания на выдавливание сферической лунки проводили согласно ГОСТ 10510-80 пуансоном диаметром 8 мм.

Структура фольги исследовалась путем съемки рентгенограмм в $\text{CuK}\alpha$ излучении на установке УРС 55М.

Испытания материалов выполняли на макетах электронных пушек, состоящих из КСУ и технологического анода при рабочей температуре катода (1050-1080°C) в течение 1200 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Использование фольги из гафния сопровождается значительными технологическими трудностями. Как показали многочисленные исследования, одна и та же партия материала может содержать неоднородные по структуре листы, которые имеют разную температуру первичной рекристаллизации. Поэтому применение единой, однажды установленной температуры отжига к любому листу практически невозможно.

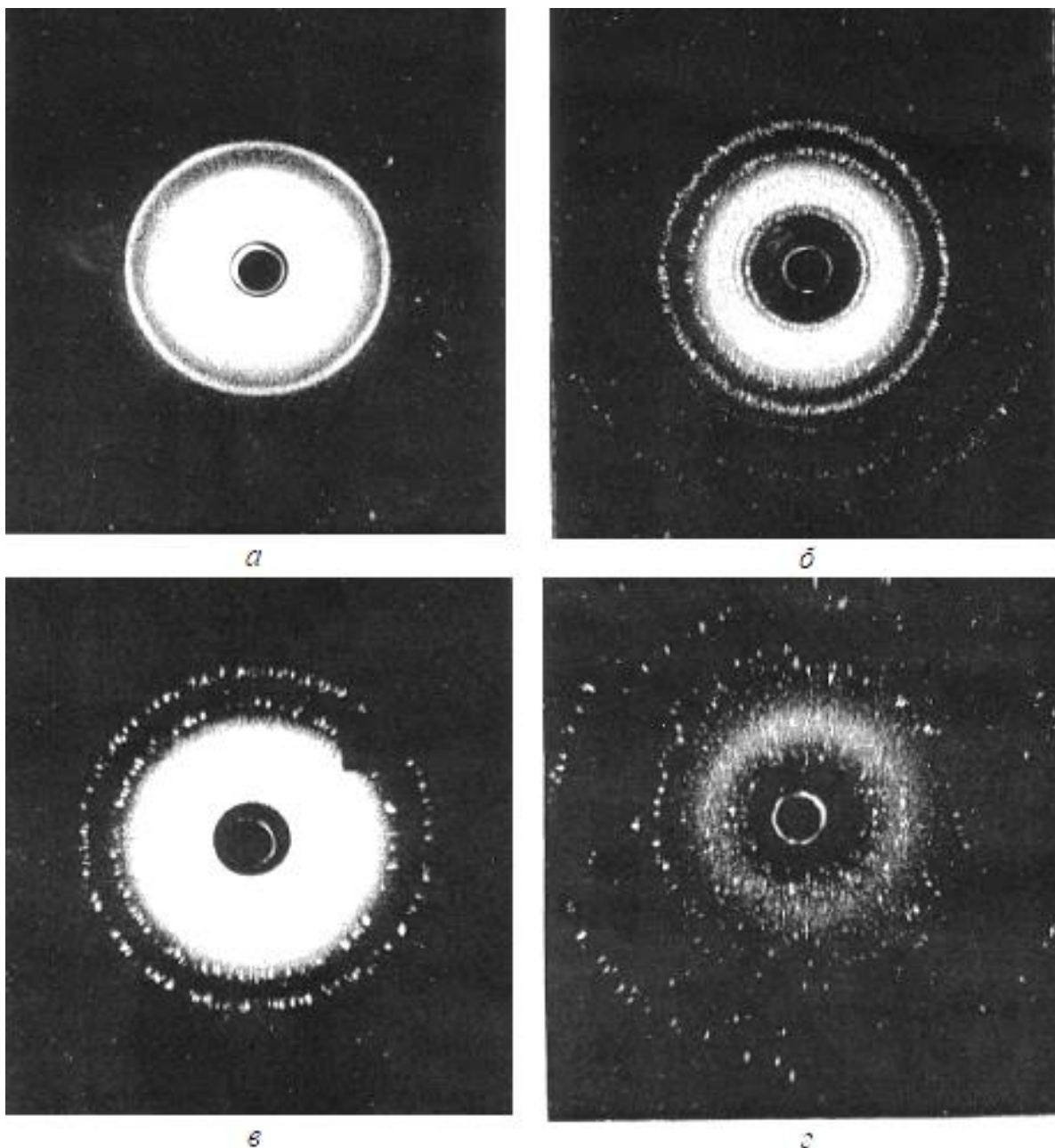
За критерий оценки требуемой температуры отжига каждого листа фольги из гафния предложены предел прочности, глубина вытяжки и структура первичной рекристаллизации, контролируемая по рентгенограммам, выполненным по методу Лауэ. Выбирается температура, при которой предел прочности материала ниже 430 МПа, а глубина вытяжки максимальная. При этом глубина вытяжки не должна быть меньше 2 мм и 2,5 мм для фольги толщиной 0,1 мм и 0,15-0,3 мм соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Сопоставление параметров фольги гафния толщиной 0,15 мм после отжига при температуре 950°C с формоустойчивостью сферических сеток

| Номер партии | Свойства | | | | Деформация перемычек | |
|--------------|--|--------------------------------------|---------------------------------|---------------|----------------------|---------------------------|
| | Прочность $\sigma_s \cdot 10^{-1}$, МПа | Относительное удлинение δ , % | Глубина вытяжки $h \cdot 10$ мм | Твердость, НВ | при очистке (ЭИО) | с разрушением при очистке |
| 1 | 55,5 | 12,3 | 4,0 | 150 | – | – |
| 2 | 42,5 | 9,0 | 2,0 | 165 | – | + |
| 3 | 40,0 | 6,5 | 1,5 | 160 | + | + |

Структура фольги исследовалась путем съемки рентгенограмм в $\text{Cu}_{K\alpha}$ излучении. Из результатов анализа рентгенограмм следует, что в гафнии в интервале температур 950-1100°C проходит процесс первичной рекристаллизации, при дальнейшем повышении температуры происходит развитие рекристаллизации и переход к ее собирательной стадии (рисунок).



Рентгенограммы (эпиграммы) фольги из гафния: деформированное состояние (а), отожженное состояние при 950°C (б), 1100°C (в) и 1200°C (г)

В табл. 2 представлены результаты измерения термоэмиссионного тока материалов в диапазоне температур 800-1200°C в условиях постоянного напыления на материал продуктов испарения с металлопористого катода (МПК) при температуре катода 1150 С.

Таблица 2

Термоэмиссионный ток с различных материалов

| Материал | Плотность тока j , А/см ² при различной температуре испытаний, °С | | | | |
|----------|--|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 |
| Молибден | $1,5 \cdot 10^{-1}$ | 1,0 | – | 5,0 | $1,2 \cdot 10^{-1}$ |
| Гафний | $1,8 \cdot 10^{-2}$ | $2,3 \cdot 10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-2}$ | $4,25 \cdot 10^{-2}$ | $5 \cdot 10^{-2}$ |
| ВнПл | $3,35 \cdot 10^{-2}$ | $3,3 \cdot 10^{-2}$ | $3,3 \cdot 10^{-2}$ | $3,0 \cdot 10^{-2}$ | $2,8 \cdot 10^{-2}$ |
| ВЦУН10-1 | $1,65 \cdot 10^{-2}$ | $6,5 \cdot 10^{-2}$ | $1,7 \cdot 10^{-2}$ | $2,0 \cdot 10^{-2}$ | $4,0 \cdot 10^{-2}$ |
| ВЦУ | $2,2 \cdot 10^{-2}$ | $3,3 \cdot 10^{-2}$ | $2,5 \cdot 10^{-2}$ | $1,67 \cdot 10^{-2}$ | $3,35 \cdot 10^{-2}$ |

Термоэмиссионные свойства молибдена в этих условиях близки к термоэмиссионным свойствам МПК практически до температуры 1100° С со снижением при температуре 1200° С. Этот материал не может использоваться как антиэмиссионный. Термоэмиссионные свойства гафния и ванадия (ВнПл) и сплавов на основе ванадия (ВЦУН10-1, ВЦУ) в тех же условиях напыления продуктов испарения с МПК значительно ниже, чем у молибдена. Эти материалы могут быть рекомендованы к применению в качестве антиэмиссионных.

При повышенных температурах в интервале 800-1100° С и вакууме $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па прочностные характеристики сплава ВЦУН10-1 в 2,5-4 раза выше, чем у гафния (табл. 3) [4].

Таблица 3

Механические свойства отожженных листовых образцов сплавов ВЦУН10-1 и гафния при комнатной и повышенных температурах (800-1100°С)

| Материал | Режим термообработки | Температура испытаний, °С | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------|
| | | 20 | | | 800 | | | 1000 | | | 1100 | | |
| | | $\sigma_B \cdot 10^{-1}$, МПа | $\sigma_{0,2} \cdot 10^{-1}$, МПа | δ , % | $\sigma_B \cdot 10^{-1}$, МПа | $\sigma_{0,2} \cdot 10^{-1}$, МПа | δ , % | $\sigma_B \cdot 10^{-1}$, МПа | $\sigma_{0,2} \cdot 10^{-1}$, МПа | δ , % | $\sigma_B \cdot 10^{-1}$, МПа | $\sigma_{0,2} \cdot 10^{-1}$, МПа | δ , % |
| ВЦУН10-1 | 1200° С 30 мин | 68,0 | 49,2 | 13,5 | – | – | – | 20,6 | 19,1 | 105,0 | 11,5 | 10,7 | 164,5 |
| ГФИ-1 | 950° С 30 мин | 45,9 | 30,8 | 14,0 | 6,5 | 4,9 | 129,5 | 5,5 | 4,6 | 205,0 | 3,2 | 3,1 | 132,5 |

Из результатов испытаний пушек с сетками из разных материалов при рабочей температуре катода (1050-1080° С) следует, что пушки с сетками из сплавов ванадия отличаются от пушек с сетками из гафния высокой стабильностью токов утечки между катодом и управляющей сеткой (табл. 4). Это может быть связано с высокой жаропрочностью

стью и формоустойчивостью сплава ванадия. Пушки с сетками из сплавов ванадия были испытаны дальше в форсированном режиме при температуре катода 1140° С, то есть испытания выполняли с коэффициентом ускорения K , который рассчитывали по авторской методике [5]. Ток утечки не достиг предельно допустимого значения 0,1 мА даже при испытании в течение 2100 ч [6].

Таблица 4

Результаты испытаний КСУ на долговечность при рабочей температуре катода

| Материал и толщина сетки $h \cdot 10^3$, м | | Значение тока утечки i_{ym} , мА, на момент времени τ , ч | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| тене- вой | управ- ляющей | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 |
| ГФИ-1 ≠0,1 | ГФИ-1 ≠0,15 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,05 | 0,08 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,8 | 0,8 |
| ВЦУ ≠0,1 | ВЦУН10-1 ≠0,15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,09 | 0,05 | 0,05 | 0,07 |

Сплавы ванадия, легированные цирконием и углеродом, относятся к высокопрочным гетерофазным сплавам с карбидным упрочнением [7]. Присутствующие мелкодисперсные карбиды ванадия VC и циркония ZrC(O) определяют их высокую жаропрочность.

ВЫВОДЫ

Разработан новый антиэмиссионный сплав на основе ванадия ВЦУН10-1. Мелкодисперсные карбиды ванадия VC и циркония ZrC(O) определяют его высокую жаропрочность. Показана взаимосвязь появления токов утечки при эксплуатации катодно-сеточных узлов между катодом и управляющей сеткой, изготовленной из гафниевой фольги, со структурной неустойчивостью гафния, которая проявляется в деформации элементов сеток.

Экспериментально доказана возможность получения катодно-сеточных узлов с повышенной долговечностью не менее чем в 2 раза при использовании для изготовления сеток сплава ВЦУН10-1, обладающего прочностью при рабочей температуре катода в 4 раза выше, чем у гафния, и значительно более высокой температурой рекристаллизации – 1300°С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые катодные материалы и возможности улучшения эмиссионных параметров электровакуумных приборов / Мельникова И.П., Козлов В.И., Усанов Д.А., Ворожейкин В.Г. // Вакуумная наука и техника // Материалы науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов / под ред. проф. Д.В. Быкова. М.: МИЭМ, 2001. С. 213-216.
2. Индукционно-термическая обработка стальных пуансонов с металлокерамическими покрытиями и диаграммы предельных деформаций для стали 45 / А.А. Фомин, М.Е. Федосеев, П.А. Палканов, А. Аман, В.А. Кошуро, А.И. Шумилин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1 (84). С. 87-92.

3. Структура и твердость стали X12MФ после электроискрового легирования цирконием и цементации в графитовой пасте / М.Е. Федосеев, В.А. Кошуро, А. Аман, А.А. Фомин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 2 (85). С. 85-90.

4. Мельникова И.П., Усанов Д.А. Критерии оценки свойств антиэмиссионных материалов для изготовления сеток катодно-сеточных узлов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1991. Вып. 1. С. 15-16.

5. А.с. SU № 1743311 5Н 01 j 1/46. Сеточный электрод для электронного прибора / И.П. Мельникова, Д.А. Усанов, В.К. Семёнов, В.Г. Ворожейкин. Заявл. 11.09.90, опубл. 08.04.91.

6. Мельникова И.П., Ворожейкин В.Г. Сетки электровакуумных приборов с сеточным управлением из новых антиэмиссионных жаропрочных сплавов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1992. Вып. 12. С. 72-77.

7. Структура и механические свойства модельных ванадиевых сплавов / Алябьев В.М., Антонова О.Б., Дружинина И.П. и др. // Физика металлов и металловедение. 1989. Т. 67. Вып. 4. С. 797-803.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мельникова Ираида Прокопьевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Iraida P. Melnikova – Dr. Sc. Tech., Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Сёмина Татьяна Юрьевна – студент 4 курса Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Tatyana Yu. Semina – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Андреева Оксана Алексеевна – студент 4 курса Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Oksana A. Andreeva – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Фомин Александр Александрович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr A. Fomin – Dr. Sc. Tech., Head: Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Д.Н. Охлупин, А.В. Королев, И.В. Синева, К.А. Авдонин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ PVD

***Аннотация.** Приведены результаты экспериментального исследования коррозионной стойкости двойного покрытия ta-C деталей методом PVD с промежуточным и окончательным полированием поверхности дискретным инструментом. Показано влияние режимных факторов на результаты полирования покрытия ta-C дискретным инструментом, предложены оптимальные режимы обработки. Испытания образцов в соляной ванне показали, что двойное покрытие ta-C методом PVD с промежуточным и окончательным полированием обеспечивает отсутствие коррозии и отслоения покрытия.*

***Ключевые слова:** алмазоподобное покрытие, коррозионная стойкость, полирование, метод PVD, термохимическая обработка*

D.N. Okhlupin, A.V. Korolev, I.V. Sineva, K.A. Avdonin

USING PVD COATING METHODS FOR THE COMPONENT PARTS

***Abstract.** The article presents the results of experimental research relating corrosion resistance of a double coating of the ta-C parts using the PVD method with an intermediate and final polishing of the surface by a discrete tool. The influence of operation factors on polishing the ta-C coating with a discrete tool is shown, and optimum processing modes are proposed. Sample tests in the salt bath have shown that the double ta-C coating, based on the PVD methodology with an intermediate and final polishing, ensures corrosion or peeling resistant coatings.*

***Keywords:** diamond-like coating, corrosion resistance, polishing, PVD method, thermochemical treatment*

ВВЕДЕНИЕ

Так как развитие агропромышленного комплекса осуществляется в направлении повышения надежности и долговечности применяемой техники, то является актуальным защита поверхностей деталей этой техники от коррозионно-механического износа. Одним из эффективных методов защиты деталей от абразивного износа в условиях повышенной загрязненности окружающей среды является нанесение на поверхности сопрягаемых деталей высокопрочного алмазоподобного покрытия (АПП). АПП обладает уникальными свойствами, в числе которых высокая твердость, повышенная теплопроводность, низкий коэффициент трения и высокая износостойкость. К числу недостатков существующих АПП относится их пористость и, как следствие, низкая коррозионная стойкость, что ограничивает применение этих покрытий в АПК. Для устранения этого недостатка ООО «ТехноТерм-Саратов» разработана технология нанесения АПП, обеспечивающая надежную защиту деталей от коррозии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сущность технологии заключается в следующем. Перед покрытием поверхность детали подвергается тщательной ультразвуковой очистке от различных окисных пленок и загрязнений. Алмазоподобное покрытие ta-C наносится в установке DREVA 600 методом PVD – вакуумным методом путем физического нанесения покрытия из паровой фазы. Для обеспечения необходимой адгезии на поверхность детали методом PVD предварительно наносится адгезионный титановый слой. Установка имеет лазерную камеру, в которой твердый графит под действием лазера превращается в газообразное состояние. Затем с помощью плотного потока плазмы, создаваемой полым катодом, и с помощью дуговых вакуумных источников испарения парообразный графит переводится в возбужденное ионизированное состояние и под действием подачи напряжения смещения BIAS осаждается на поверхности адгезионного слоя детали, превращаясь в алмазоподобное покрытие.

Недостатком этого метода является то, что метод PVD не обеспечивает однородной плотной структуры, так как на поверхности покрытия всегда имеются микроскопические частицы графита и других дефектов, через которые может проникать влага. Поэтому нанесенное покрытие полируется, поверхность снова подвергается тщательной очистке, а затем деталь снова помещается в установку DREVA 600, где наносится еще один слой алмазоподобного покрытия ta-C. После это покрытие приобретает не только высокую твердость и способность сопротивляться износу, но и высокую коррозионную стойкость.

До недавнего времени наиболее сложной в указанном технологическом процессе была операция полирования покрытия. Из-за высокой твердости покрытия, существующие методы шлифования и доводки [1-4] не обеспечивали требуемой шероховатости поверхности, которая должна составлять Ra 0,04 и при достижении которой удаляются частица графита и все другие частицы покрытия с плохой адгезией. Поэтому на смену им предложены другие методы, наиболее перспективным из которых является метод термохимической обработки [5-8].

Метод термохимической обработки использует одно из «слабых» свойств алмаза – способность растворяться в переходных металлах в присутствии высокой температуры. Сущность способов обработки алмазных покрытий, основанных на методе термохимической обработки, заключается в трении алмазного покрытия с контртелом, изготовленным в виде диска из переходного металла – железа, никеля, титана и других [9-10]. В результате трения возникает температура, необходимая для графитизации алмаза и удаления шероховатого верхнего слоя покрытия. Процесс термохимической обработки основан на явлении каталитической газификации алмазов в среде водорода и протекает в четыре стадии: переход атомов углерода из алмаза в приповерхностный слой металла-катализатора; перенос атомов углерода в объеме металла; переход растворенного в металле углерода в газовую фазу; вынос газообразных углеродосодержащих соединений из зоны реакции. Недостатками данных способов являются невозможность обработки покрытия малой толщины из-за высокого съема припуска и низкая производительность из-за многоэтапности процесса.

В развитие химико-термического метода обработки алмазных покрытий в ООО «ТехноТерм-Саратов» предложен механо-химико-термический метод. Сущность этого метода заключается в том, что обработку поверхности осуществляют дискретным

инструментом в виде металлической щетки. Тем самым создаются условия для осуществления одновременно двух процессов воздействия на обрабатываемую поверхность – механического и химико-термического. Механическое разрушение вершин микронеровностей обрабатываемой поверхности происходит от ударов ворсинок инструмента. Химико-термическая обработка осуществляется под действием высокой температуры, возникающей в результате трения металлического инструмента-катализатора с обрабатываемой поверхностью. Таким образом, эффективность механо-химико-термического метода обеспечивается тем, что он основан на использовании сразу двух «слабых» свойств алмаза, его хрупкости и способности растворяться в определенных условиях в переходных материалах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве образцов при проведении экспериментальных исследований использовалась деталь «Призма» производства АО «Алтайский завод прецизионных изделий». Данная деталь используется в топливной аппаратуре автотракторных двигателей внутреннего сгорания. Рабочими поверхностями детали являются три плоские грани. Деталь работает в сложных условиях многократного циклического нагружения при наличии загрязнений, влаги и ограниченной смазки.

Для проведения исследований использовались две группы деталей по 10 экспериментальных образцов в каждой группе. Образцы подвергались всем необходимым операциям технологического процесса нанесения на рабочие поверхности износостойкого антикоррозионного алмазоподобного покрытия – ультразвуковой мойке, нанесению алмазоподобного покрытия в установке DREVA 600 и полировке. Вторая группа образцов после полировки подвергалась вторичному нанесению покрытия в установке DREVA 600 и полировке.

Полировка поверхности покрытия осуществлялась механо-химико-термическим методом на вертикально фрезерном станке 615П. В качестве инструмента использовалась стальная торцевая щетка. Инструмент закреплялся на шпинделе станка вместо фрезы.

Для определения рациональных условий полирования осуществлялся полный трехфакторный эксперимент на двух уровнях. Область определения варьируемых факторов приведена в таблице.

Варьируемые факторы и области их определения

| Наименование фактора, размерность | Обозначения факторов | Кодовые обозначения | Границы области определения | |
|---|----------------------|---------------------|-----------------------------|---------|
| | | | нижняя | верхняя |
| Частота вращения инструмента, мин ⁻¹ | n | X ₁ | 1000 | 2000 |
| Поперечная подача, мм | t | X ₂ | 0,5 | 1,0 |
| Скорость продольной подачи, мм/мин | S | X ₃ | 200 | 400 |

Образец закреплялся в машинных тисках. Поперечная подача инструмента отсчитывалась от момента касания инструмента бумажного листа, помещенного между инструмен-

том и обрабатываемой поверхностью. В качестве показателей процесса рассматривалось R_a – среднее арифметическое отклонение микропрофиля обработанной поверхности, мкм. В каждой точке плана экспериментов обрабатывалось 3 образца. Обработка осуществлялась в два рабочих хода – в прямом и обратном направлениях. Шероховатость поверхности после обработки замерялась прибором Mar Surf PS1.

В качестве математической модели были приняты линейные зависимости показателя обработки от варьируемых факторов. Статистическая обработка результатов экспериментов и построение регрессионной зависимости осуществлялась по общепринятой методике. Для проверки гипотезы однородности дисперсии использовался критерий Кохрена. Значимость коэффициентов регрессии определяли по t – критерию Стьюдента. Адекватность модели оценивали по критерию Фишера. Во всех этих случаях уровень значимости принимался равным 5 %.

На основе статистической обработки результатов эксперимента получены следующие регрессионные зависимости:

– для рабочего хода в прямом направлении

$$R_a = 0,1904 + 0,000059 n + 0,0719 t + 0,000202 S; \quad (1)$$

– для рабочего хода в обратном направлении

$$R_a = 0,0838 + 0,000024 n + 0,025 t + 0,000072 S. \quad (2)$$

На рис. 1 представлена зависимость среднего арифметического отклонения микропрофиля обработанной поверхности от частоты вращения инструмента после прямого рабочего хода.

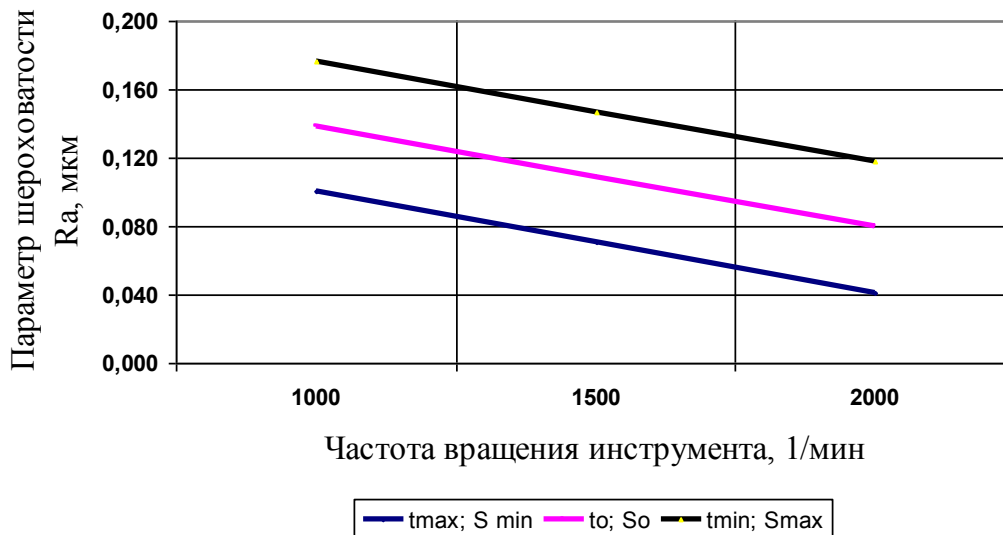


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности R_a , мкм от частоты вращения инструмента n мин⁻¹ при различных сочетаниях поперечной t , мм/ход и скорости продольной S , мм/мин подач после прямого рабочего хода инструмента

На рис. 2 представлена зависимость среднего арифметического отклонения микропрофиля обработанной поверхности от частоты вращения инструмента после обратного рабочего хода.

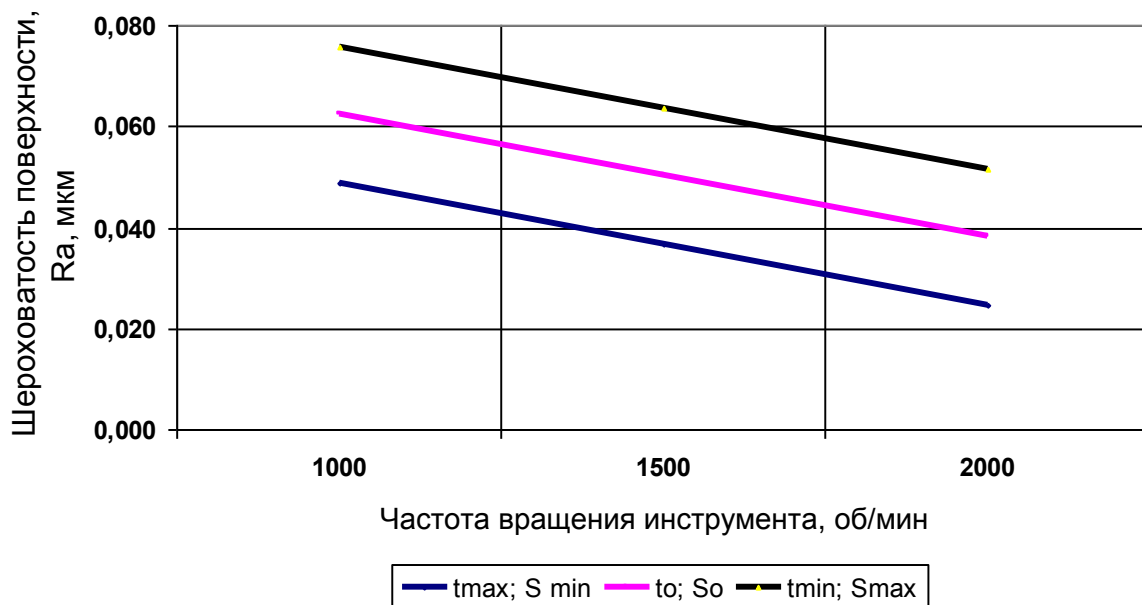


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности R_a , мкм, от частоты вращения инструмента n , об/мин при различных сочетаниях поперечной t , мм/ход и скорости продольной S , мм/мин подачи после обратного рабочего хода инструмента

Как видно из рис. 1 и 2, с возрастанием частоты вращения инструмента шероховатость обработанной поверхности уменьшается. Объясняется это тем, что в процессе обработки действуют два взаимосвязанных фактора – механический и химико-термический, и действия этих обоих факторов с возрастанием частоты вращения инструмента усиливается. Чем выше частота вращения инструмента, тем с большей силой щетинки инструмента воздействуют на вершинки микронеровностей и обеспечивают их скалывание. К тому же число таких ударов возрастает в единицу времени. Это приводит к снижению шероховатости поверхности. Процесс микроскалывания вершин микронеровностей при прямом рабочем ходе инструмента идет настолько интенсивно, что шероховатость поверхности по сравнению с исходной поверхностью образцов уменьшается в несколько раз. Причем при максимальном значении поперечной подачи инструмента и минимальной скорости продольной подачи это изменение происходит более значительно, чем при минимальной поперечной подачи и максимальной скорости продольной подачи.

Хотя механический фактор при первом рабочем ходе оказывает превалирующее влияние, но все же с увеличением частоты вращения инструмента возрастает энергия трения и, как следствие, температура в зоне обработки. Это активизирует химико-термический процесс, что также способствует снижению шероховатости поверхности.

Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что шероховатость поверхности после второго рабочего хода существенно уменьшилась – в 1,7-2,3 раза. Механизм этого влияния заключается в том, что при втором рабочем ходе влияние на шероховатость поверхности механического фактора падает, так как щетинки инструмента скользят по гладкой поверхности и вероятность скола микронеровностей уменьшается. Поэтому на втором рабочем ходе с повышением частоты вращения инструмента и, как следствие, температуры в зоне обработки возраста-

ет интенсивность химико-термического процесса, происходящего на обрабатываемой поверхности, в результате которого происходит фазовый переход с образованием графита. В данной ситуации щетинки металлической щетки являются прекурсором процесса графитизации, а реагентом – кислород воздуха. Химико-термический процесс более интенсивно идет на вершинах микронеровностей, чем во впадинах, поэтому происходит уменьшение шероховатости очень мелких микронеровностей, оставшихся после скалывания крупных микронеровностей.

Из рис. 1 и 2 видно, что значение частоты вращения инструмента оказывает большее влияние на результат обработки, чем другие исследуемые факторы. Так, если увеличение частоты вращения инструмента в 2 раза (рис. 2) приводит к снижению шероховатости поверхности в 1,5-2 раза, то при увеличении величины поперечной подачи в два раза снижение шероховатости поверхности составляет от 20% при минимальном значении частоты вращения инструмента и максимальной скорости продольной подачи до 80% при максимальной частоте вращения инструмента и минимальной скорости продольной подачи. Объясняется такое влияние скорости продольной подачи на результат обработки тем, что с возрастанием поперечной подачи увеличивается число щетинок инструмента, контактирующих с обрабатываемой поверхностью, и увеличением площади контакта, так как щетинки при большой глубине прогибаются и более плотно прилегают к обрабатываемой поверхности. С увеличением площади контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью возрастает температура в зоне обработки. Все это активизирует химико-термический процесс, происходящий в зоне обработки, и способствует снижению шероховатости поверхности. Но на механический фактор величина поперечной подачи оказывает незначительное влияние.

Скорость продольной подачи оказывает противоположное влияние тому, какое оказывают на шероховатость обработанной поверхности частота вращения инструмента и величина его поперечной подачи. С возрастанием величины скорости продольной подачи инструмента шероховатость поверхности возрастает. Объясняется это тем, что с увеличением скорости продольной подачи уменьшается время контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, а это приводит к снижению числа ударов щетинок инструмента о выступы микронеровностей. Кроме того, с возрастанием скорости продольной подачи улучшаются условия охлаждения рабочей зоны и уменьшается температура в зоне обработки. Одновременное снижение и механического и химико-термического воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность с возрастанием скорости продольной подачи способствует увеличению шероховатости поверхности.

С использованием уравнений регрессии (1) и (2) была разработана методика оптимизации условий обработки. Критерием оптимизации являлась производительность процесса доводки, которая зависит от скорости продольной подачи. Ограничительным фактором явилась шероховатость обработанной поверхности. Требуемая шероховатость обработанной поверхности составляет $R_a 0,04$ мкм. Но значения шероховатости поверхности образцов имеют естественный разброс. На основе проведенного эксперимента получено значение среднего квадратического отклонения значений шероховатости поверхности для обратного рабочего хода равное $\sigma = 0,0053$ мкм. Поэтому нормативное значение шероховатости поверхности принято $R_{aн} 0,038$ мкм. При этом нормативном значении шероховатости 90% образцов должны иметь шероховатость поверхности, не превышающую тре-

буемой. Значения режимных факторов ограничивались условиями эксперимента, приведенными в таблице.

При указанных условиях оптимальными значениями режимов полирования являются следующие: частота вращения инструмента – 2000 мин^{-1} ; скорость продольной подачи 400 мм/мин ; поперечная подача инструмента после его касания обрабатываемой поверхности $0,5 \text{ мм}$. При этих условиях осуществлялась механическая обработка каждой из указанных выше двух групп образцов. Вторая группа образцов подвергалась полированию дважды – после первой операции нанесения покрытия и после второй операции нанесения покрытия. Обработке подвергались сразу все 10 образцов, установленные на столе станка в специальном приспособлении.

На рис. 3 в качестве примера приведены результаты полирования одной из групп образцов.

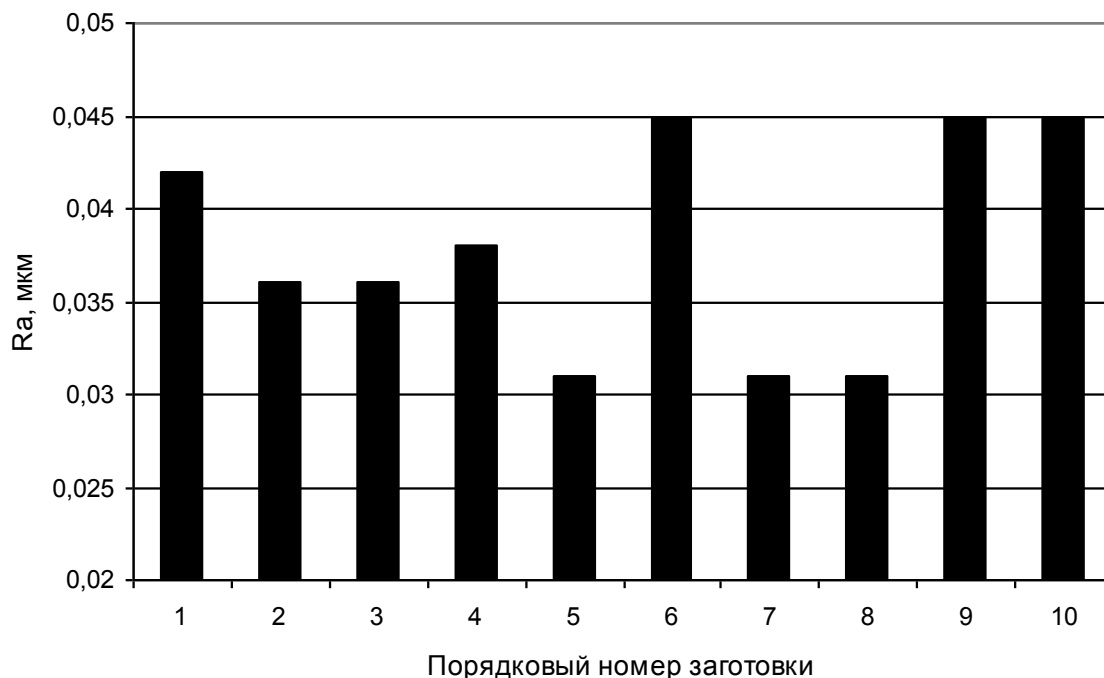


Рис. 3. Шероховатость поверхности заготовок в партии

Как видно из рис. 3, среднее значение шероховатости поверхности в данной партии $Ra = 0,038 \text{ мкм}$, $\sigma = 0,0059 \text{ мкм}$. Доля образцов, имеющих шероховатость поверхности выше требуемой, получилась несколько выше расчетной, но на незначительную величину.

Изучение структуры поверхности покрытия осуществлялась с помощью сканирующего электронного микроскопа сверхвысокого разрешения Tescan Mira 2 LM. Микроскоп снабжен катодом с полевой эмиссией и с иммерсионной оптикой. Характеризуется непревзойденными оптическими свойствами, немерцающим цифровым изображением превосходного качества. Современное дружественное программное обеспечение для управления микроскопом, накопления и обработки изображений, работающее в среде Windows™. Имеет стандартные форматы сохранения изображений, систему архивирования, обработки и удобного

просмотра изображений, проведения измерений на изображении, автоматическую система настройки микроскопа и множество других автоматизированных процедур. Исследование показало, что поверхность полированной поверхности имеет равномерную структуру, на поверхности отсутствуют наросты металла и другие инородные элементы.

Глубина покрытия измерялась на микроскопе Olympus BX51 путем изучения микрошлифов, изготовленных на приборе CALOTEST®. Анализ микрошлифов обработанных поверхностей заготовок показал, что толщина покрытия составляет не менее 2,1 мкм, что находится в допустимом пределе. Поэтому было принято решение осуществить проверку покрытия на коррозионную стойкость.

Испытания на коррозионную стойкость проводились в камере оборудования Ascott SS-450 путем воздействия на образцы соляным туманом водностью 2-3 г/м³ в течение 2 часов при температуре (20±5)°С. Затем температура в камере увеличивалась до (35±5)°С, а время выдержки составляло 22 часа. После этого цикл повторялся. Общее количество циклов воздействия соляного тумана на образцы составляло 7, общая продолжительность воздействия составила 168 часов.

После завершения испытаний был произведен визуальный осмотр испытываемых образцов. На поверхности образцов с двойным покрытием ta-C никаких изменений на поверхности и следов коррозии не обнаружено. На всех образцах, которые имели одно покрытие, наблюдалось отслоение покрытия и следы коррозии на поверхности под покрытием. Из этого следует, что дважды нанесенный защитный слой PVD покрытия ta-C обеспечивает защиту поверхности от коррозии.

ВЫВОДЫ

На основе выполненных исследований установлено, что двойное покрытие ta-C поверхностей прецизионных деталей методом PVD обеспечивает надежную антикоррозионную защиту поверхности от влаги и агрессивных сред и может применяться при изготовлении агропромышленной техники, работающей в сложных условиях внешнего воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polishing Substrates of Single Crystal Silicon Carbide and Sapphire for Optoelectronics / O.Y. Filatov, V.I. Sidorko, S.V. Kovalev, Y.D. Filatov, A.G. Vetrov // *Functional Materials*. 2016 (23). № 1. P. 104-110.
2. Effect of Slurry Composition on the Chemical Mechanical Polishing of Thin Diamond Films / M. Werrell, J.S. Mandal, E.L.H. Thomas, O.A. Williams, E.B. Brousseau, R. Lewis, P. Borri, P.R. Davies // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2017 (18). № 1. P. 654-663.
3. Исследование влияния механической полировки на состояние поверхности алмаза методом дифракции обратно рассеянных электронов / Е.В. Коростылев, В.С. Бормашов, С.А. Тарелкин, М.А. Доронин // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2017. № 1. С. 74-78.
4. Hicks M.-L., Pakpour-Tabrizi A.C., Jackman R.B. Polishing, Preparation and Patterning of Diamond for Device Applications // *Diamond and Related Materials*. 2019 (97). 107424.

5. Дерябкин А.В. Диффузионная термохимическая обработка поверхности алмаза // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 4. 35-37.
6. Дерябкин А.В., Федоров Ю.Ю., Темиряева М.П. Исследование зависимости шероховатости поверхности алмаза при термохимической обработке на никелевых и железных поверхностях разного класса чистоты // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018 (1). 550-551.
7. Two-Step Polishing Technique for Single Crystal Diamond (100) Substrate Utilizing a Chemical Reaction with Iron Plate / A. Kubota, S. Nagae, S. Motoyama, M. Touge // Diamond and Related Materials. 2015 (60). P. 75-80.
8. A Comprehensive Study of Mechanical and Chemo-Mechanical Polishing of CVD Diamond / S. Roy, V.K. Balla, A.K. Mallik, N. Dandapat, V.G. Ralchenko, A.P. Bolshakov, E.E. Ashkinazi // Materials Today: Proceedings. 2018, 9846-9854.
9. Способ полирования поверхности поликристаллических алмазов: пат. RU 2369473. В24В 1/00. Опубл. 10.10.2009.
10. Способ полировки алмазных пластин: пат. RU 2483856. В24В 37/04, В24В 1/00. Опубл. 10.06.2013. Бюл. № 16.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Охлупин Дмитрий Николаевич –
директор ООО «ТехноТерм-Саратов»,
г. Саратов

Dmitry N. Okhlupin –
Director of TechnoTherm-Saratov, Saratov

Королев Альберт Викторович –
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технология и системы
управления в машиностроении»
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Albert V. Korolev –
Dr. Sci. Tech., Professor, Department of
Control Systems and Technologies in
Mechanical Engineering, Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov

Синев Илья Владимирович –
кандидат физико-математических наук,
доцент Саратовского национального
исследовательского государственного
университета имени Н.Г. Чернышевского

Илья V. Sinev –
Ph.D., Associate Professor,
National Research Saratov State University

Авдонин Кирилл Андреевич –
аспирант кафедры «Технология и системы
управления в машиностроении»
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Kiril A. Avdonin –
Postgraduate, Department of Control Systems
and Technologies in Mechanical
Engineering, Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov

Правила оформления и представления статей

1. Статья, направляемая в редакцию журнала «Вестник СГТУ», должна быть тщательно отредактирована и представлена в электронном виде в формате текстового редактора «MS Word 2007» (параметры страницы – А 4; поля – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12; межстрочный интервал – 1,0). Текст статьи представляют в редакцию по электронной почте vestnik@sstu.ru.

2. Статья должна содержать краткий обзор проблемы, из которого следует постановка задачи, обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы, свидетельствующие о новизне полученных результатов.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов,
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные),
- краткая (5-7 строк) аннотация (курсив),
- ключевые слова.

Далее авторы, название статьи, аннотация и ключевые слова повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и список литературы.

Статья завершается сведениями об авторах: Ф.И.О. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны. Сведения об авторах также повторяются на английском языке.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора – 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунка.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров Excel, Quattro Pro, MS Graph. Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0**. Каждая формула должна иметь номер.

6. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д., и т. п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.0.5-2008 и включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

8. К статье прилагается экспертное заключение.

9. Рукопись статьи рецензируется ведущим ученым в данной области, как правило, доктором наук.

10. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

11. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

12. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

13. Для публикации и своевременной подготовки журнала необходимо заполнить регистрационную карту участника, представляемую отдельным файлом. Высылается вместе с рукописью.

14. Плата с аспирантов за публикацию статьи не взимается.

Вестник Саратовского государственного технического университета

– рецензируемое научное периодическое издание по 2 отраслям науки: технические науки, физико-математические науки и следующим специальностям и направлениям:

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки, физико-математические науки), 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки), 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки, физико-математические науки); **05.02.00 – Машиностроение и машиноведение:** 05.02.08 – Технология машиностроения; **05.16.00 – Металлургия и материаловедение:** 05.16.09 – Материаловедение (технические науки).

Журнал имеет следующие соответствующие указанным группам специальностей разделы содержания:

- Информатика, вычислительная техника и управление
- Машиностроение и машиноведение
- Металлургия и материаловедение

Журнал публикует статьи только по данным группам специальностей!

| <u>Регистрационная карта публикующегося в журнале «Вестник СГТУ»</u> | | |
|--|------------------------|--|
| Фамилия | Имя | Отчество |
| Полное название статьи | | |
| Ученая степень | Ученое звание | Должность с указанием кафедры, отдела, лаборатории |
| Электронная почта | Служебный телефон/факс | Домашний адрес и телефон |
| Наименование направляющей статью организации | | |
| Группа специальностей, к которой относится статья | | |