



Издается с 2004 года

DOI: [10.12737/issue\\_59353e29359d42.01434475](https://doi.org/10.12737/issue_59353e29359d42.01434475)

Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Брянский государственный технический университет» (БГТУ)

Председатель редакционного совета - Федонин О.Н., д-р техн. наук, проф.

Заместитель председателя редакционного совета Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет:

Абрамов А.А., д-р техн. наук, проф. (Москва)

Аверченков В.И., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Агеев Е.В., д-р техн. наук, проф. (Курск)

Албагачиев А.Ю., д-р техн. наук, проф. (Москва)

Анцев В.Ю., д-р техн. наук, проф. (Тула)

Бабичев А.П., д-р техн. наук, проф. (Ростов-на-Дону)

Безъязычный В.Ф., д-р техн. наук, проф. (Рыбинск)

Бухач А., д-р техн. наук, проф. (Польша)

Буяновский И.А., д-р техн. наук, проф. (Москва)

Вайнер Л.Г., д-р техн. наук, доц. (Хабаровск)

Волохов Г.М., д-р техн. наук, проф. (Коломна)

Горленко О.А., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Давыдов С.В., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Дьяконов А.А., д-р техн. наук, проф. (Челябинск)

Ивахненко А.Г., д-р техн. наук, проф. (Курск)

Клименко С.А., д-р техн. наук, проф. (Украина)

Кобищанов В.В., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Константинов И.С., д-р техн. наук, проф. (Белгород)

Космодамианский А.С., д-р техн. наук, проф. (Москва)

Макаренко К.В., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Мокрицкий Б.Я., д-р техн. наук, проф. (Комсомольск-на-Амуре)

Пестер А., д-р техн. наук, проф. (Австрия)

Петрешин Д.И., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Протасьев В.Б., д-р техн. наук, проф. (Тула)

Савин Л.А., д-р техн. наук, проф. (Орел)

Смоленцев В.П., д-р техн. наук, проф. (Воронеж)

Соловьев Д.Л., д-р техн. наук, проф. (Муром)

Степанов Ю.С., д-р техн. наук, проф. (Орел)

Суслов А.Г., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Хандожко А.В., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Хейфец М.Л., д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

Химухин С.Н., д-р техн. наук, проф. (Хабаровск)

Янюшкин А.С., д-р техн. наук, проф. (Братск)

Редколлегия

Главный редактор - Киричек А.В., д-р техн. наук, проф.

Зам. главного редактора - Морозова А.В., канд. соц. наук

Отв. секретарь - Татаринцев В.А., канд. техн. наук

Корректор - Ерохина В.А.

Редактор - Щербакова М.Л.

Адрес редакции

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
(4832) 58-82-77

Сайт: <http://vestnik.tu-bryansk.ru>

E-mail: [vestnik@tu-bryansk.ru](mailto:vestnik@tu-bryansk.ru)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство ПИ № ФС77-21709 от 17 августа 2005 года

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении или непосредственно в редакции журнала. Индексы по каталогу «Пресса России»: 18945 – полугодовая; 15621 – годовая

Журнал включен в специализированный референтный библиографический сервис CrossRef

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по группам специальностей

05.02.00 – Машиностроение и машиноведение

05.16.00 – Металлургия и материаловедение

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление

05.22.00 – Транспорт

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Вестник Брянского государственного технического университета», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

# BULLETIN

SCIENTIFIC  
TECHNICAL  
JOURNAL

## of BRYANSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

№ 5 (58)  
2017

Issued since 2004

DOI: [10.12737/issue\\_59353e29359d42.01434475](https://doi.org/10.12737/issue_59353e29359d42.01434475)

Founder and Publisher – Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
“Bryansk State Technical University” (BSTU)

Chairman of Editorial Council – **O.N. Fedonin**, *D.Eng., Prof.*Vice-Chairman of Editorial Council – **E.A. Pamfilov**, *D.Eng., Prof.*

Editorial Council:

**A.A. Abramov**, *D.Eng., Prof., (Moscow)***V.I. Averchenkov**, *D.Eng., Prof., (Bryansk)***E.V. Ageev**, *D.Eng., Prof., (Kursk)***A.Yu. Albagachiev**, *D.Eng., Prof., (Moscow)***V.Yu. Antsev**, *D.Eng., Prof., (Tula)***A.P. Babichev**, *D.Eng., Prof., (Rostov-upon-Don)***V.F. Bezyazychny**, *D.Eng., Prof., (Rybinsk)***A. Bukhach**, *D.Eng., Prof., (Poland)***I. A. Buyanovsky**, *D.Eng., Prof., (Moscow)***L.G. Vainer**, *D.Eng., Assistant Prof., (Khabarovsk)***G.M. Volokhov**, *D.Eng., Prof., (Kolonna)***O.A. Gorlenko**, *D.Eng., Prof., (Bryansk)***S.V. Davydov**, *D.Eng., Prof., (Bryansk)***A. A. D'yakonov**, *D.Eng., Prof., (Chelyabinsk)***A.G. Ivakhnenko**, *D.Eng., Prof., (Kursk)***S.A. Klimenko**, *D.Eng., Prof., (Ukraine)***V.V. Kobishchanov**, *D.Eng., Prof., (Bryansk)***I.S. Konstantinov**, *D.Eng., Prof., (Belgorod)***A.S. Kosmodamianskiy**, *D.Eng., Prof., (Moscow)***K.V. Makarenko**, *D.Eng., Prof., (Bryansk)***B.Ya. Mokritsky**, *D.Eng., Prof., (Komsomolsk-upon Amur)***A. Pester**, *D.Eng., Prof., (Austria)***D.I. Petreshin**, *D.Eng., Prof., (Bryansk)***V.B. Protasiev**, *D.Eng., Prof., (Tula)***L.A. Savin**, *D.Eng., Prof., (Orel)***V.P. Smolentsev**, *D.Eng., Prof., (Voronezh)***D.L. Solovyov**, *D.Eng., Prof., (Murom)***Yu.S. Stepanov**, *D.Eng., Prof., (Orel)***A.G. Suslov**, *D.Eng., Prof., (Bryansk)***A.V. Khandozhko**, *D.Eng., Prof., (Bryansk)***M.L. Kheifits**, *D.Eng., Prof., (Belarus)***S.N. Khimukhin**, *D.Eng., Prof., (Khabarovsk)***A.S. Yanyushkin**, *D.Eng., Prof., (Bratsk)*

Editorial Board:

Editor-in-Chief – **A.V. Kirichek**, *D.Eng., Prof.*Deputy Editor-in-Chief – **A.V. Morozova**, *Can.Sociol. Sc.*Executive Secretary – **V.A. Tatarintsev**, *Can.Eng.*Proof-reader – **V.A. Yerokhina**Editor – **M.L. Shcherbakova**

Editorial Office Address:

7, 50 years of October Boulevard, Bryansk, 241035, Russia

Phone: (4832) 58-82-77

Site: <http://vestnik.tu-bryansk.ru>E-mail: [vestnik@tu-bryansk.ru](mailto:vestnik@tu-bryansk.ru)

A journal is registered in Federal Service for supervision of law observance in mass communications and cultural heritage protection. Certificate ПИ № ФС77-21709 of August 17, 2005

A journal is spread through a subscription which may be drawn up in any post-office or directly in the editorial office of the journal. Indices on the catalogue “Russia Press”: 18945 – for semi-annual subscription; 15621 – for annual subscription

Journal is included in a specialized consultant bibliographical service CrossRef

Reprinting, all kinds of material copying and reproduction of materials published in the journal “Bulletin of Bryansk State technical University” is allowed only with the Editorial Board’s permission and a reference to the source of information

## СОДЕРЖАНИЕ

**Машиностроение и машиноведение**

- Зернин М.В., Рыбкин Н.Н.** Алгоритмы эффективной организации взаимосвязей упругой и гидродинамической составляющих конечноэлементного моделирования упругогидродинамики узлов трения 4
- Денисенко А.Ф., Якимов М.В.** Влияние температуры опоры шпиндельного узла на ее надежность 15
- Феофилов Н.Д., Янов Е.С., Ямников А.С.** Приспособления для закрепления образцов во время проведения экспериментальных исследований 23
- Ходыревская С.В., Горохов А.А., Куц О.Г., Мальнева Ю.А.** Аналитическое описание режущих кромок сменных многогранных пластин сборных фасонных фрез 29
- Сьянов С.Ю.** Разработка функционально-ориентированных технологических процессов электроэрозионной обработки 36
- Шишкина А.П., Лебедев В.А., Чаава М.М.** Энергетические аспекты виброобработки деталей косточковыми органическими средами 42
- Мокрицкий Б.Я., Морозова А.В., Конюхова Я.В., Мокрицкая Е.Б.** Особенности восстановительной обработки колёс железнодорожных вагонов 50
- Тихомиров В.П., Горленко А.О., Измеров М.А., Ерохин А.Н.** Моделирование контактного взаимодействия сферических поверхностей подшипников скольжения 56

**Информатика, вычислительная техника и управление**

- Акулов П.А., Петрешин Д.И.** Автоматизированная установка измерения силы сочленения и расчленения единичного контакта электрического соединителя 66

**Металлургия и материаловедение**

- Балаев А.Ф.** Исследование ультразвуковой релаксации остаточных напряжений металлических пластин на основе компьютерного моделирования 73

**Транспорт**

- Сливинский Е.В., Киселёв В.И.** Модернизация ходовых частей тепловоза ТЭП60 79
- Комаров А.И., Вдовин А.В., Забелин А.Л.** Разработка технологии восстановления вкладышей коренных и шатунных опор коленчатого вала двигателя D-355C «KOMATSU» 84

## CONTENTS

**Mechanical engineering and engineering science**

- M.V. Zernin, N.N. Rybkin.** Efficient organization algorithms of interconnections of elastic and hydrodynamic constituents of finite element simulation of friction unit elastic hydrodynamics 4
- A.F. Denisenko, M.V. Yakimov.** Temperature impact of spindle unit bearing upon its stiffness 15
- N.D. Feofilov, E.S. Yanov, A.S. Yamnikov.** Devices for sample fastening during experimental investigations 23
- S.V. Khodyrevskaya, A.A. Gorokhov, O.G. Kuts, Yu. A. Malneva.** Cutting edge analytical description of replaceable indexable inserts of compound form cutters 29
- S.Yu. Syanov.** Development of functionally-oriented technological process of electrical discharge machining 36
- A.P. Shishkina, V.A. Lebedev, M.M. Chaava.** Energy aspects of parts vibrating processing with kernel organic environment 42
- B.Ya. Mokritsky, A.V. Morozova, Ya.V. Konyukhova, E.B. Mokritskaya.** Peculiarities in reduction treatment of railroad car wheels 50
- V.P. Tikhomirov, A.O. Gorlenko, M.A. Izmerov, A.N. Yerokhin.** Modeling of contact interaction of spherical surfaces of bearings of sliding 56

**Informatics, computer engineering and management**

- P.A. Akulov, D.I. Petreshin.** Automated plant for measurement of joint and disjoint force of electric connector single contact 66

**Metallurgy and materials science**

- A.F. Balaev.** Supersonic relaxation investigation of metal plate residual stresses based on cad 73

**Transportation means**

- E.V. Slivinsky, V.I. Kiselyov.** Undercarriage modernization of diesel locomotive TEP60 79
- A.I. Komarov, A.V. Vdovin, A.L. Zabelin.** Technology development for bushes rebuilding of crankshaft- and crankpin bearings for crankshaft of engine D-355C "KOMATSU" 84

**Машиностроение и машиноведение**

УДК 519.3: 621.822

DOI: 10.12737/article\_59b11cba23e7a6.86663670

М.В.Зернин, Н.Н.Рыбкин

**АЛГОРИТМЫ ЭФФЕКТИВНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ УПРУГОЙ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГОГИДРОДИНАМИКИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ**

Сформулированы основы алгоритмов, снижающих трудоемкость решения связанной задачи упругогидродинамики. Приведено несколько вариантов построения экономичных сеток конечных элементов. Кратко описан экономичный вариант реализации метода конденсации, применяемый для того, чтобы в нелинейной процедуре рассматривались только узлы, расположенные на рабочих поверхностях узла трения. Подробно изложен алгоритм приведения распределенных по поверхности

давлений к системе сосредоточенных узловых нагрузок. Приведены формулы для вычисления перемещений точек поверхности в направлении, нормальном к ней.

**Ключевые слова:** задачи упругогидродинамики, упругие деформации, гидродинамические давления, метод конечных элементов, сгущение сетки, метод редуцирования, метод конденсации, аппроксимирующий полином.

M.V. Zernin, N.N. Rybkin

**EFFICIENT ORGANIZATION ALGORITHMS OF INTERCONNECTIONS OF ELASTIC AND HYDRODYNAMIC CONSTITUENTS OF FINITE ELEMENT SIMULATION OF FRICTION UNIT ELASTIC HYDRODYNAMICS**

Basic algorithms decreasing labor intensity in the solution of a problem connected with elastic hydrodynamics are formulated. Some options for the formation of cost-effective grids of finite elements are presented. It is shown the efficient use of the method of condensation in order that in a non-linear procedure only the units located on operation surfaces of a friction unit should be considered. A cost-effective option for the realization of a condensation method is de-

scribed in a short way. The algorithm of the reduction of pressures distributed on a surface to the system of concentrated unit loads is stated thoroughly. The computation algorithm of points displacements of a surface in the direction perpendicular to it is shown.

**Key words:** elastic hydrodynamics problems, elastic deformations, hydrodynamic pressures, finite element method, grid concentration, reduction method, condensation method, approximating polynomial.

**Постановка задачи**

В БГТУ развиваются [1-5] конечно-элементные методы расчета гидродинамики динамически нагруженных подшипников скольжения (ПС) на основе уравнений Рейнольдса. Выполняется подготовка к реализации третьей версии, в которой будут учтены неоднородное поле температур, а также упругие и термоупругие перемещения деталей ПС на основе трехмерного конечноэлементного моделирования [6; 7]. Здесь рассмотрены особенности взаимосвязи гидродинамической задачи (определение параметров течения смазывающей жидкости в зазоре) с задачей упругого деформирования деталей узла трения. Отметим, что в такой упругогидродинамической задаче (УГД-задаче) появляется дополнительная нелинейность именно из-за

необходимости определения параметров взаимосвязи двух задач в итерационном процессе. Задача упругая - линейна при заданных граничных условиях, задача гидродинамическая - нелинейна и требует организации трех вложенных друг в друга итерационных процедур [5]. Для динамически нагруженных ПС цикл их нагружения разбит на малые временные шаги (обычно связанные с углом относительно поворота деталей). Этот расчет также завершается не за один цикл, так как критерием его корректного завершения является замыкание траектории движения центра вала относительно центра ПС.

Если решать только гидродинамическую задачу (отыскание поля давлений в масляном слое при изотермических усло-

виях и недеформируемых поверхностях), то реализуются [1-5] следующие нелинейные процедуры: поиск границ гидродинамического клина, обеспечение равновесия вала под действием внешней нагрузки и эпюры давлений. Но часто условия нагружения в зоне гидродинамического контакта таковы, что поверхности трибузла

упруго деформируются от действия давлений. Требуется многократное решение указанных задач в трехмерной постановке. Фактически гидродинамическая задача должна быть решена многократно, и трудоемкость решения такой УГД-задачи возрастает в десятки раз.

### Варианты снижения трудоемкости за счет рациональных конечноэлементных сеток

Для компьютерной реализации алгоритма должны быть предусмотрены меры по повышению его эффективности, в том числе за счет выбора рационального типа конечных элементов (КЭ) для температурной и упругой (термоупругой) задач. В нашей статье [8] показано, что за счет применения специальных КЭ с квазисовместными аппроксимациями можно снизить трудоемкость решения ТУГД-задачи более чем на порядок. Эффективность применения квазисовместных двадцатиузловых КЭ заключается в точном моделировании полей искомых параметров

сравнительно малым количеством КЭ с большим соотношением сторон (до 100:1 и более). Например, конечноэлементные сетки вала и деталей ПС могут быть такими, как показано на рис. 1а. Но экономичное представление упругих деталей малым количеством КЭ может усложнить учет граничных условий кавитации. Граница области давлений (сжимающих) и области их отсутствия (кавитации) может проходить не по узлам сетки, а по граням достаточно больших КЭ. Учет таких граничных условий возможен, но достаточно сложно реализуется.

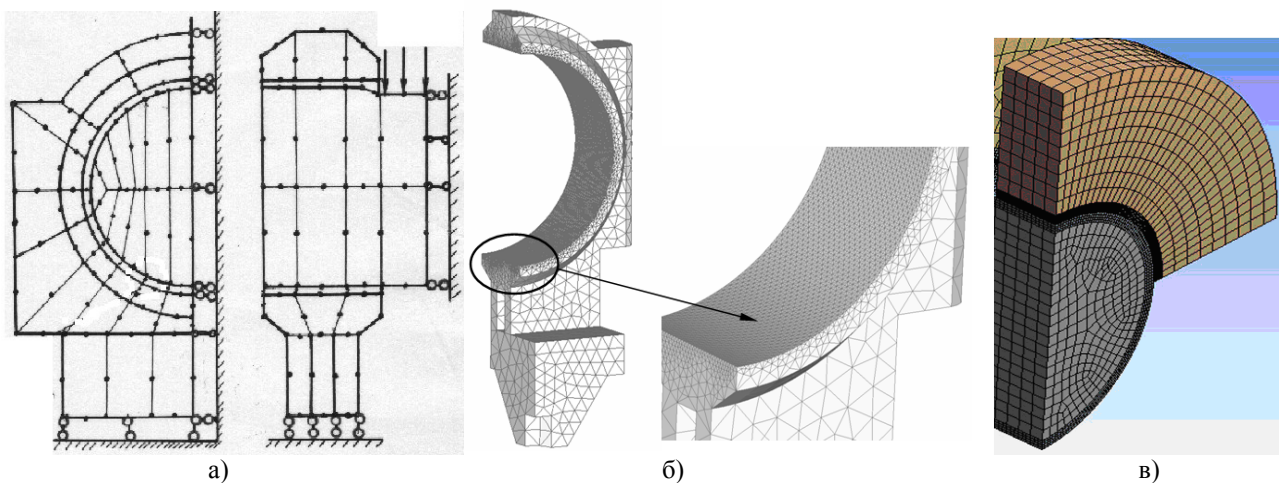


Рис. 1. Конечноэлементные сетки деталей подшипника скольжения: а - при использовании квазисовместных конечных элементов; б - при сгущении сетки; в - при применении приема редуцирования для согласования различающихся сеток

Альтернативные варианты – существенное сгущение сетки КЭ в зоне контактирования деталей (рис. 1б) или использование метода редуцирования. В последнем случае отдельные конструктивные элементы (баббитовый слой на рис. 1в) или фрагменты деталей (тонкий поверхностный слой вала на рис. 1в) разбиты на мелкие КЭ, а основная часть деталей – на более крупные КЭ. Сетки с различными по размерам КЭ корректно сшиваются по ме-

тоду редуцирования [9]: требуемая гладкость функции на границе обеспечивается за счет соответствующего согласования полиномов, аппроксимирующих эту функцию по разные стороны от границы. Алгоритмы автоматической генерации сеток переменной густоты и алгоритмы редуцирования реализованы в промышленных программных пакетах, например в FEMAP [10]. Поэтому можно подготавливать требуемые сетки в промышленных программ-

ных пакетах, а процесс итерационного решения УГД-задачи реализовать как от-

дельный внешний модуль.

### Снижение трудоемкости за счет применения процедуры конденсации

Еще один прием, позволяющий значительно снизить трудоемкость задачи, также часто используется и называется «конденсация». Заключается он в том, что можно выделить группы узлов, которые необходимы для организации итерационных процедур УГД-задачи. Такие узлы расположены на рабочих поверхностях ПС, так как именно податливость поверхности и теплоотвод через поверхности из слоя масла вглубь деталей ПС участвуют во взаимосвязях составляющих задач. Такие узлы в методе конденсации называют внешними или граничными (обозначены индексом  $gr$ ), все остальные - внутренними (обозначены индексом  $vn$ ).

Метод конденсации состоит в том, что исключают внутренние узлы. Но исключают их таким образом, что оставшиеся в расчетной схеме граничные узлы отображают свойства всей конструкции (со всеми узлами). И после решения УГД-задачи можно рассмотреть исходные разбивки со всеми узлами и КЭ и определить в них все требуемые характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС). Процедура конденсации основана на следующем представлении разрешающей системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) МКЭ:

$$[K]\{U\} = \{P\}. \quad (1)$$

$$\left[ [K_{gr-gr}] - [K_{gr-vn}] [K_{vn-vn}]^{-1} [K_{vn-gr}] \right] \{U_{gr}\} = \{P_{gr}\} - [K_{gr-vn}] [K_{vn-vn}]^{-1} \{P_{vn}\}. \quad (5)$$

Из условия симметрии матрицы жесткости можно записать:  $[K_{gr-vn}] = [K_{vn-gr}]^T$ . Одно из распространенных названий метода конденсации – «метод суперэлементов». Поэтому окончательно можно записать разрешающее уравнение для суперэлемента (индекс  $se$ ) в следующем виде:

$$[K_{se}]\{U_{se}\} = \{P_{se}\}, \quad (6)$$

где искомый вектор перемещений  $\{U_{se}\} = \{U_{gr}\}$ ; матрица коэффициентов су-

Если все внутренние узлы с перемещениями  $\{U_{vn}\}$  сгруппировать вверху, а все граничные узлы с перемещениями  $\{U_{gr}\}$  внизу, то систему (1) можно представить в виде следующих блоков:

$$\begin{bmatrix} [K_{vn-vn}] & [K_{vn-gr}] \\ [K_{gr-vn}] & [K_{gr-gr}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_{vn}\} \\ \{U_{gr}\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_{vn}\} \\ \{P_{gr}\} \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

Такое представление системы является условным. В реальных системах внутренние и граничные узлы расположены вперемешку, и преобразование системы к виду (2) может существенно снизить эффективность хранения матрицы жесткости. Обычно матрица жесткости является ленточной и симметричной. Перестановка элементов этой матрицы может существенно увеличить ширину ленты, возрастут требуемые для хранения матрицы объемы памяти.

Простейшим преобразованием из уравнения (2) можно получить два отдельных уравнения:

$$[K_{vn-vn}]\{U_{vn}\} + [K_{vn-gr}]\{U_{gr}\} = \{P_{vn}\}, \quad (3)$$

$$[K_{gr-vn}]\{U_{vn}\} + [K_{gr-gr}]\{U_{gr}\} = \{P_{gr}\}. \quad (4)$$

Выразив  $\{U_{vn}\}$  из уравнения (3) и подставив результат в уравнение (4), после преобразований получим:

перэлемента

$$[K_{se}] = [K_{gr-gr}] - [K_{vn-gr}]^T [K_{vn-vn}]^{-1} [K_{vn-gr}];$$

вектор правых частей

$$\{P_{se}\} = \{P_{gr}\} - [K_{vn-gr}]^T [K_{vn-vn}]^{-1} \{P_{vn}\}.$$

Следует отметить, что сокращение количества неизвестных не приводит к ухудшению точности решения задачи. Система уравнений (6) сохраняет все свойства системы уравнений (1). После определения по (6) значений граничных пере-

мещений  $\{U_{se}\} = \{U_{gr}\}$  их можно подставить в уравнение (3) и вычислить значения внутренних перемещений  $\{U_{vn}\}$ . Последующее определение параметров НДС здесь не обсуждается.

Остановимся на вариантах реализации метода конденсации. Выше приведено много матричных уравнений, и может сложиться впечатление, что трудоемкость реализации метода конденсации достаточно высока, так как требуется выполнение серии матричных операций. Однако фактически операции метода конденсации являются операциями метода Гаусса решения СЛАУ. Так, получение уравнения (6) из уравнения (1) является незавершенной (неполной) процедурой прямого хода метода Гаусса. Незавершенность состоит в том, что исключены только внутренние узлы (степени свободы). Причем такую процедуру исключения авторы реализовали без изменения формы хранения исходной матрицы СЛАУ (1). После выполнения таких действий можно выбрать коэффициенты матрицы суперэлемента  $[K_{se}]$  и вектора нагрузок на узлы суперэлемента  $\{P_{se}\}$ . После определения перемещений узлов суперэлемента можно продолжить решение СЛАУ (1) с уже известными значениями  $\{U_{se}\} = \{U_{gr}\}$ . Фактически это неполная реализация обратного хода метода Гаусса, а именно определение  $\{U_{vn}\}$  при уже известных (из решения уравнения (6)) перемещениях  $\{U_{se}\} = \{U_{gr}\}$ .

Итак, в нелинейных процедурах можно за счет применения метода конденсации эффективно решать системы уравнений. Напомним, что большинство алго-

ритмов решения нелинейных задач МКЭ сводятся к методу последовательных приближений и на каждой итерации необходимо решать СЛАУ. Метод конденсации позволяет выделить те уравнения, которые не участвуют в нелинейной схеме, и исключить эти уравнения, выполнив неполный прямой ход метода Гаусса. В нелинейной схеме остается система уравнений значительно меньших размеров. Далее эту нелинейную систему уравнений можно разрешить путем многократного решения СЛАУ. Причем такие СЛАУ необязательно решать методом Гаусса. Многие исследования показали, что эффективнее применять метод квадратного корня Холецкого [6]. На этом этапе тоже можно экономить. Если требуется многократное решение СЛАУ с одной и той же матрицей коэффициентов, а изменяются только правые части СЛАУ, то в нелинейной процедуре требуется многократное преобразование правых частей и определение неизвестных. Начальные процедуры (обычно наиболее трудоемкие) можно выполнить один раз. Так, при использовании метода Гаусса прямой ход (факторизацию матрицы) можно выполнить один раз. При использовании метода Холецкого один раз выполняется разложение матрицы коэффициентов на верхнюю треугольную и нижнюю треугольную.

Если применять метод конденсации, то в решении УГД-задачи задействованы только узлы рабочих поверхностей узла трения. Трудоемкость может быть снижена на порядки.

### Алгоритм моделирования взаимосвязи упругой и гидродинамической задач

Между конечноэлементными сетками, используемыми для решения гидродинамической задачи и упругой задачи, непосредственной взаимосвязи нет. Для примера на рис. 2б показана развертка масляного слоя крейцкопфного ПС судового дизеля. На рис. 2а приведены следующие обозначения параметров, используемых при решении ГД-задачи:  $d$  – диаметр вала;  $D$  – диаметр рабочей поверхности

подшипника (расточки);  $x, y, z$  – декартовы координаты в плоскости, перпендикулярной оси подшипника, и вдоль оси подшипника;  $\theta$  – угловая координата;  $\omega$  – скорость вращения вала в подшипнике;  $e_x$  и  $e_y$  – проекции эксцентриситета (удаления центра вала от центра расточки подшипника) на координатные оси;  $F_x$  и  $F_y$  – проекции на координатные оси нагрузки, действующей на вал. На рис. 2а можно выделить две

системы координат: декартову -  $x, y, z$  и цилиндрическую -  $\theta, z$ . Для наглядного представления полученных результатов часто используют также условную систему координат, отличающуюся от реальной цилиндрической системы координат отсчетом угловой координаты вдоль прямой линии. На рис. 2б вместо декартовой коор-

динаты  $z$  использована угловая координата  $\theta$ , т.е. показана так называемая развертка масляного слоя. Иначе сетку КЭ, моделирующую масляный слой, изобразить невозможно. Результаты решения ГД-задачи также нагляднее демонстрировать на развертке.

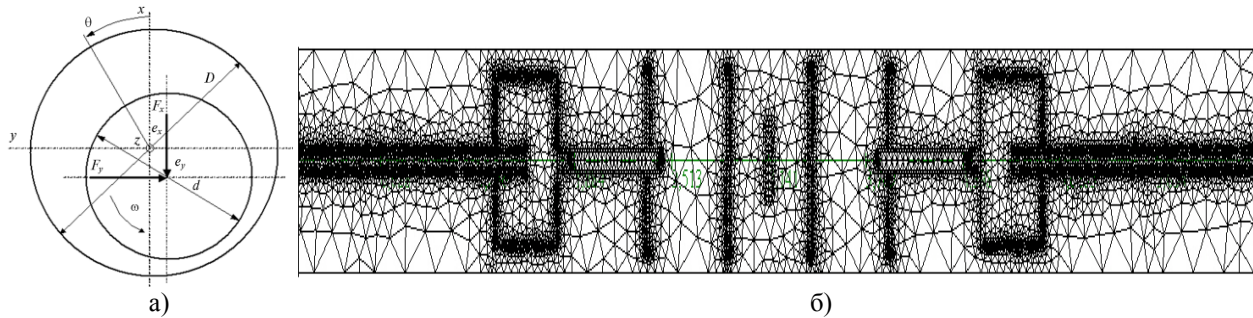


Рис. 2. Система координат и геометрические параметры гидродинамической задачи (а) и конечноэлементная сетка развертки масляного слоя кривокопфного подшипника судового дизеля (б)

Масляный слой дискретизирован на треугольные конечные элементы первого порядка. Вблизи канавок реализовано сгущение сетки. Варианты конечноэлементных сеток для упругих деталей этого же ПС показаны на рис. 1а,б. Сетки упругой и ГД задач не взаимосвязаны. Результатами решения ГД-задачи являются зазоры (толщины масляного слоя  $h(\theta, z)$ ) и давления в масляном слое  $p(\theta, z)$ . Результатами решения упругой задачи являются в первую очередь перемещения узлов сетки КЭ. При необходимости можно определить другие параметры НДС. Взаимосвязь гидродинамической и упругой задач реализуется посредством учета давлений и изменения геометрии деталей (изменение зазоров между их поверхностями): полученные в результате решения гидродинамической задачи давления должны быть учтены в качестве силовых граничных условий в упругой задаче; полученные в результате решения упругой задачи перемещения рабочих поверхностей должны быть учтены в следующей итерации решения гидродинамической задачи. Основная идея учета податливости заключается в дополнении зависимости для расчета зазоров при недеформируемых поверхностях ПС слагаемым, учитывающим деформацию поверхностей:

$$h = Const - e_x \cos \theta - e_y \sin \theta + L(p), \quad (7)$$

где первые три слагаемых определяют зазор (толщину слоя масла) из геометрии цилиндрического ПС с недеформируемыми поверхностями (рис. 2а), а  $L(p)$  – оператор податливостей, связывающий значения упругого радиального перемещения одной или обеих поверхностей с действующими давлениями. В нашем случае значения перемещений определяются из расчетов по МКЭ упругих деталей.

Рассмотрим подробнее, как следует реализовать такие взаимосвязи, на примере цилиндрических ПС. Эпюра давлений (даже на развертке рабочей поверхности) может быть достаточно сложной геометрической фигурой (в зависимости от наличия канавок, отверстий и т.п. элементов). Для примера на рис. 3а приведена эпюра давлений в кривокопфном ПС с системой канавок для подачи масла (сетка КЭ приведена на рис. 2б). На рис. 3б приведена эпюра давлений в ПС турбины с эллиптической (лимонной) расточкой при перекосе осей вала и ПС. На этой эпюре давлений имеются две зоны гидродинамического контакта (два масляных клина), расположенные на верхнем и нижнем вкладышах. В обеих эпюрах (рис. 3а,б) можно выделить участки с высокими градиентами давлений. В декартовой и цилиндрической системах координат эпюра давлений будет выглядеть столь сложно, что изобразить ее



на плоском рисунке практически невозможно. Можно только представить набором одномерных графиков для различных сечений. Можно выделить общие положения, характерные для эпюр давлений в ПС:

1. Эпюра давлений - всегда гладкая поверхность, хотя могут быть большие градиенты вблизи канавок и других подобных элементов.

2. Давления всегда направлены по нормали к рабочим поверхностям ПС.

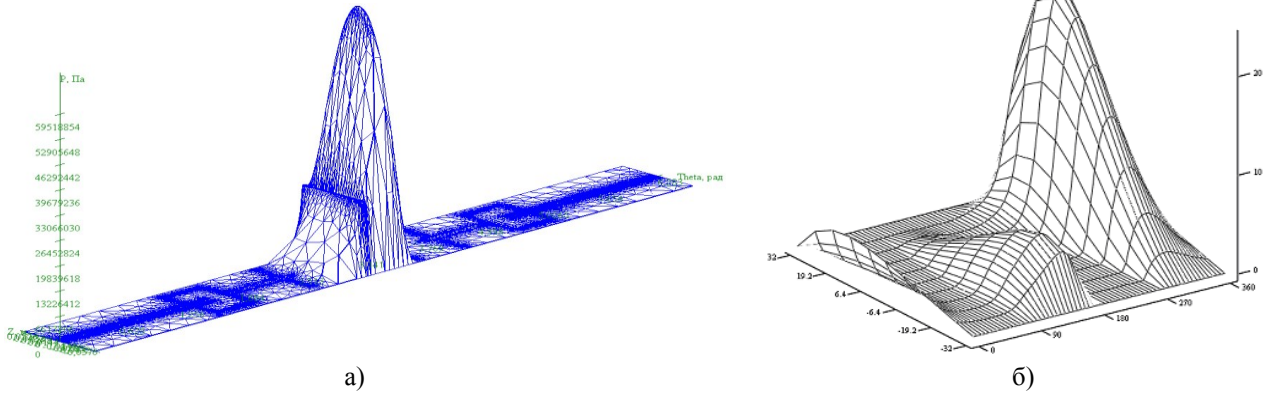


Рис. 3. Примеры эпюр давлений: а - в крейцкопфном подшипнике скольжения с системой масляных канавок; б - в турбинном подшипнике скольжения с эллиптической расточкой при перекосе осей

Учитывая эти положения, можно принять, что на грань каждого КЭ, принадлежащую участку рабочей поверхности, действует по нормали эпюра, которую можно описать полиномом (рис. 4а). Любая точка грани удалена от центра декартовой системы координат  $x$ - $y$ - $z$  на расстояние радиуса-вектора  $\bar{R}$ . Учесть эту эпюру в упругом расчете можно посредством приведения такой распределенной по поверхности грани нагрузки к системе нагрузок, приложенных к узлам этой грани, по методике, приведенной в работах [6; 7]. Для этого (рис. 4б) на грани с распределенной нагрузкой вводится локальная

двухмерная система криволинейных координат  $(\xi - \eta)$ , а 8 узлов, расположенные на этой грани, повторно нумеруются (первый раз они нумеровались в составе всех 20 узлов КЭ). На декартовых осях откладываются орты  $\bar{e}_1$ ,  $\bar{e}_2$  и  $\bar{e}_3$ , а в точке центра грани – единичная нормаль  $\bar{n}$ . Также изображены орты  $\bar{R}_{,\xi}$  и  $\bar{R}_{,\eta}$  производных радиуса-вектора  $\bar{R}$  по локальным координатам  $\xi$  и  $\eta$ . Здесь и далее знак запятой в нижнем индексе означает операцию дифференцирования по указанной следом координате.

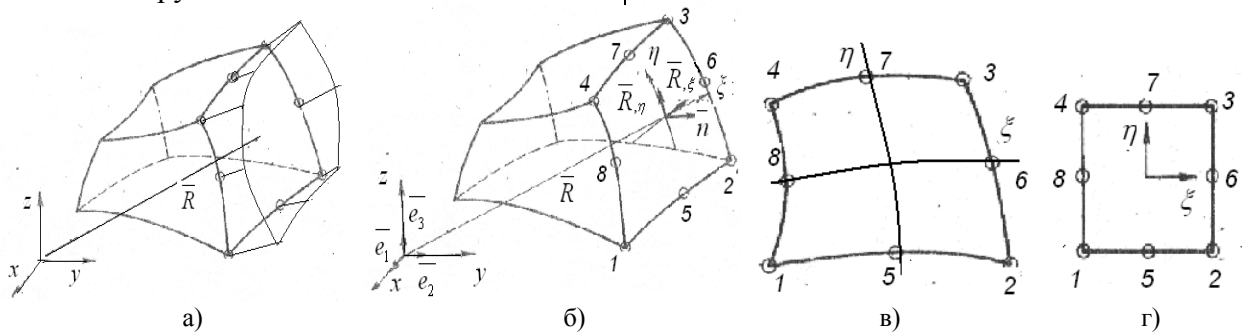


Рис. 4. Двадцатиузловой конечный элемент с эпюрой давлений, приложенной к одной грани (а), дополнительные геометрические построения для преобразования распределенной нагрузки к узловой (б), плоское изображение грани в прямоугольных (в) и криволинейных локальных (г) координатах

Координаты точек этой грани в трехмерной декартовой системе координат можно выразить [6; 7] через соответствующие

координаты восьми узлов и восемь двухмерных функций формы для этих узлов:

$$x = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) x_i; \quad y = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) y_i; \quad z = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) z_i, \quad (8)$$

где функции формы взяты из таблицы.

Таблица

Функции формы восьмиузлового элемента и их производные по локальным координатам

Номера узлов $i$	Функции формы $N_i(\xi, \eta)$	Производная по $\xi$ $N_{i,\xi}(\xi, \eta)$	Производная по $\eta$ $N_{i,\eta}(\xi, \eta)$	$\xi_i$	$\eta_i$
1, 2, 3, 4	$(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(\xi\xi_i + \eta\eta_i - 1)/4$	$(2\xi\xi_i^2 + \xi_i\eta\eta_i + 2\xi\xi_i^2\eta\eta_i + \xi_i\eta^2\eta_i^2)/4$	$(2\eta\eta_i^2 + \xi\xi_i\eta_i + 2\xi\xi_i\eta\eta_i^2 + \xi^2\xi_i\eta_i^2)/4$	$\pm 1$	$\pm 1$
5, 7	$(1 - \xi^2)(1 + \eta\eta_i)/2$	$-\xi(1 + \eta\eta_i)$	$(1 - \xi^2)\eta_i/2$	0	$\pm 1$
6, 8	$(1 + \xi\xi_i)(1 - \eta^2)/2$	$\xi_i(1 - \eta^2)/2$	$(1 + \xi\xi_i)\eta$	$\pm 1$	0

Далее используются производные от глобальных координат точки грани по локальным координатам  $\xi$  и  $\eta$ . Формулы этих

$$x_{,\xi} = \sum_{i=1}^8 N_{i,\xi}(\xi, \eta)x_i; \quad y_{,\xi} = \sum_{i=1}^8 N_{i,\xi}(\xi, \eta)y_i; \quad z_{,\xi} = \sum_{i=1}^8 N_{i,\xi}(\xi, \eta)z_i; \quad (9)$$

$$x_{,\eta} = \sum_{i=1}^8 N_{i,\eta}(\xi, \eta)x_i; \quad y_{,\eta} = \sum_{i=1}^8 N_{i,\eta}(\xi, \eta)y_i; \quad z_{,\eta} = \sum_{i=1}^8 N_{i,\eta}(\xi, \eta)z_i. \quad (10)$$

Производные от функций формы по локальным координатам приведены в таблице.

В общем случае распределенная нагрузка, приложенная к грани элемента, может быть направлена произвольно и характеризоваться тремя эпюрами:  $p_x(\xi, \eta)$ ,  $p_y(\xi, \eta)$  и  $p_z(\xi, \eta)$ . Так как в УГД-задаче в качестве распределенной по грани нагрузки выступает гидродинамическое давление,

$$\cos(\bar{n}, \bar{e}_1) = A/\sqrt{EG - F^2}; \quad \cos(\bar{n}, \bar{e}_2) = B/\sqrt{EG - F^2}; \quad \cos(\bar{n}, \bar{e}_3) = C/\sqrt{EG - F^2}, \quad (11)$$

где константы правой части вычисляются по формулам

$$A = y_{,\xi}z_{,\eta} - y_{,\eta}z_{,\xi}; \quad B = x_{,\eta}z_{,\xi} - x_{,\xi}z_{,\eta}; \quad C = x_{,\xi}y_{,\eta} - x_{,\eta}y_{,\xi};$$

$$E = x_{,\xi}^2 + y_{,\xi}^2 + z_{,\xi}^2; \quad G = x_{,\eta}^2 + y_{,\eta}^2 + z_{,\eta}^2; \quad F = x_{,\xi}x_{,\eta} + y_{,\xi}y_{,\eta} + z_{,\xi}z_{,\eta}.$$

Подставив в формулы (9) и (10) значения координат узлов, можно вычислить в этих конкретных точках поверхности производные от декартовых координат по локальным координатам. Далее можно вычислить параметры  $A, B, C, E, G$  и  $F$  в этих точках.

$$\bar{P}_{pi} = \begin{Bmatrix} P_{pi}^x \\ P_{pi}^y \\ P_{pi}^z \end{Bmatrix} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 E_3 N_i(\xi, \eta) p(\xi, \eta) \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \end{Bmatrix} d\xi d\eta \quad (12)$$

где  $E_3$  - единичная матрица размером  $3 \times 3$ .

Интегралы (12) можно взять аналитически только при простейших видах функции давлений  $p(\xi, \eta)$ . Так, в случае приложения к плоской прямоугольной

производных получаем в результате дифференцирования формул (8).

ние, всегда направленное по нормали к поверхности, то его можно характеризовать одной эпюрой  $p(\xi, \eta)$ . Но для определения проекций давления на глобальные оси координат  $x, y, z$  требуется вычислять направляющие косинусы внешней нормали к точкам грани КЭ. В [6] приведен подробный вывод соответствующих формул. Здесь приведем их окончательный вид в удобной для реализации форме:

Компоненты вектора сил, действующие на  $i$ -й узел, статически эквивалентные действующей по поверхности грани нагрузке  $p(\xi, \eta)$ , можно вычислить по формуле [6]

грани площадью  $\Delta F$  постоянного распределенного нормального давления  $p(\xi, \eta) = p = \text{const}$  суммарная сила  $P = p\Delta F$  разносится по восьми узлам грани следующим образом. К узлам, лежащим на цен-

трах сторон (номера 5, 6, 7, 8), прикладываются усилия  $P/3$ , направленные так же, как и давления  $p$ . К узлам, расположенным в углах грани (номера 1, 2, 3, 4), прикладываются усилия  $P/12$ , направленные против действующего давления  $p$ .

$$\overline{P}_{pi} = \begin{Bmatrix} P_{pi}^x \\ P_{pi}^y \\ P_{pi}^z \end{Bmatrix} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n E_3 N_i(\xi, \eta) p(\xi, \eta) \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \end{Bmatrix} \Big|_{\xi_j \eta_k} H_j H_k, \quad (13)$$

где  $E_3$  - единичная матрица размером  $3 \times 3$ ;  $n$  - количество точек интегрирования по каждому из двух направлений;  $\xi_j$  и  $\eta_k$  - координаты точек интегрирования;  $H_j$  и  $H_k$  - соответствующие весовые коэффициенты. Для трех компонент вектора усилий, действующих на  $i$ -й узел, можно записать:

$$P_{pi}^x = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n N_i(\xi, \eta) p(\xi, \eta) A \Big|_{\xi_j \eta_k} H_j H_k;$$

$$P_{pi}^y = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n N_i(\xi, \eta) p(\xi, \eta) B \Big|_{\xi_j \eta_k} H_j H_k;$$

$$P_{pi}^z = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n N_i(\xi, \eta) p(\xi, \eta) C \Big|_{\xi_j \eta_k} H_j H_k.$$

Порядок интегрирования (и соответствующее число точек интегрирования) выбирается в зависимости от порядка подинтегральных функций. Используются функции формы  $N_i(\xi, \eta)$  второго порядка. Они умножаются на функции давлений  $p(\xi, \eta)$ , которые тоже имеют порядок не ниже второго. Рассмотрим выбор параметров численного интегрирования подробнее на основе [6; 7]. Используют метод одномерного численного интегрирования, известный как квадратура Гаусса - Лежандра. В этом методе для известной степени полинома  $m$  интегрируемой функции подбираются такое число точек интегри-

При всех более сложных вариантах функции давлений интегралы (12) следует определять численно по методу Гаусса - Лежандра:

рования и такие значения их координат, чтобы интегрирование выполнялось точно. Значения весовых коэффициентов получаются из решения системы уравнений. В [7] показано, что существует такое соответствие степени интегрируемого полинома и количества требуемых точек интегрирования: при  $m=1$   $n=1$ ; при  $m=3$   $n=2$ ; при  $m=5$   $n=3$ ; при  $m=7$   $n=4$ . Значения степени полинома  $m$  всегда нечетные. Если нужно интегрировать полином четной степени, количество точек интегрирования следует выбирать для ближайшего большего нечетного.

В случае интегрирования по нескольким локальным координатам применяются мультипликативные формулы. По каждому из направлений применяется одномерный вариант. На рис. 5 приведена информация о координатах и весовых коэффициентах для  $n=2, 3, 4$  в двухмерном случае. В зависимости от показателя степени полинома по обоим независимым направлениям  $m_\xi$  и  $m_\eta$  выбирается количество точек интегрирования, обычно соответствующее  $n^2$ . Так, при  $m_\xi, m_\eta \leq 3$   $n^2=4$  (рис. 5а), при  $m_\xi, m_\eta \leq 5$   $n^2=9$  (рис. 5б) и при  $m_\xi, m_\eta \leq 7$   $n^2=16$  (рис. 5в).

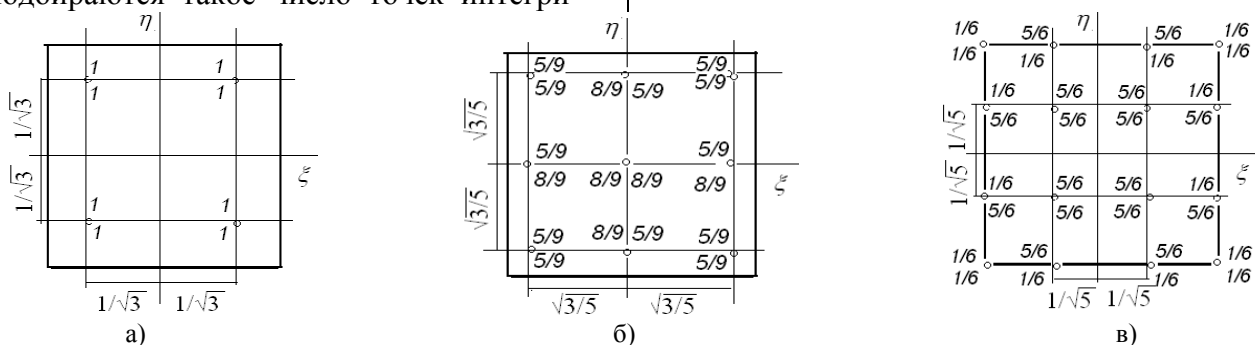


Рис. 5. Расположение точек интегрирования и значения весовых коэффициентов:  
а -  $m_\xi, m_\eta \leq 3$ ; б -  $m_\xi, m_\eta \leq 5$ ; в -  $m_\xi, m_\eta \leq 7$

В качестве тестовых задач рассчитаны задачи об изгибе консольно закреплённой балки (рис. 6). Если приложена постоянная распределённая нагрузка интенсивностью  $q$  (рис. 6а), то аналитическое решение для упругой линии является уравнением четвертой степени относительно продольной координаты. Если к консольно закреплённой балке приложена линейно убывающая распределённая нагрузка (рис. 6б), то уравнение упругой линии является

уравнением пятого порядка относительно продольной координаты. Если к консольно закреплённой балке приложена квадратично убывающая распределённая нагрузка (рис. 6в), то уравнение упругой линии является уравнением шестой степени относительно продольной координаты. Результаты расчетов по МКЭ с нагрузкой, приведенной к узлам (по описанной выше методике), соответствуют аналитическим решениям.

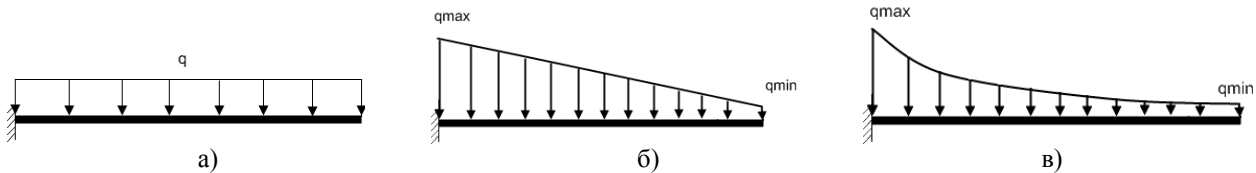


Рис. 6. Изгиб консольно закрепленной балки под действием распределенной нагрузки:  
а - равномерной; б - линейной; в - параболической

### Варианты получения формул, аппроксимирующих давления

В квадратуре Гаусса - Лежандра для численного интегрирования (12) используется формула для гидродинамических давлений  $p(\xi, \eta)$ . Причем эта формула должна быть полиномиальной, так как в зависимости от степени этого полинома выбирается система точек интегрирования. В результате решения ГД-задачи на треугольной сетке КЭ имеем значения давлений в узлах. В пределах каждого треугольного КЭ реализована билинейная интерполяция давлений. На основе этих данных необходимо построить полиномиальную аппроксимацию для эпюры давлений. Далее следует выделить отдельные полиномиальные формулы для давлений на грань каждого из КЭ упругой задачи, поверхность которого является частью рабочей поверхности узла трения. Возможны различные варианты решения таких задач.

В первом варианте строится двумерный аппроксимирующий полином давлений на развертке поверхности трения, например по методике [11]. Далее при рассмотрении отдельных граней КЭ упругой задачи по полученной аппроксимирующей формуле вычисляются значения давлений

в узлах КЭ упругой задачи. Постулируется, что степень полинома  $p(\xi, \eta)$  не превышает порядка аппроксимации, используемой для геометрии упругого КЭ. Локальная формула для давлений на грань такого КЭ строится с применением функций формы упругого КЭ:

$$p = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) p_i. \quad (14)$$

Этот вариант применим в тех случаях, когда всю эпюру давлений, действующую на поверхность, можно представить одной аппроксимирующей формулой. Однако возможно, что на поверхность воздействует несколько разделенных эпюр давлений (рис. 3б). В этих случаях требуется построение нескольких аппроксимирующих формул типа (14). Или же можно использовать двумерные полиномиальные сплайн-аппроксимации [12]. Причем сплайн строится из участков, соответствующих граням КЭ упругой задачи. При этом обеспечивается необходимая гладкость общей аппроксимирующей формулы и получаются локальные аппроксимации для отдельных граней.

### Вычисление перемещений поверхностей по нормали (дополнительных зазоров)

В результате решения упругой задачи имеем перемещения узлов упругих КЭ (по три составляющие в соответствии с декар-

товой системой координат). По этой информации требуется получить для узлов треугольной сетки ГД-задачи значения до-

полнительных толщин масляного слоя (дополнительных зазоров от упругого деформирования одной и другой поверхно-

$$U_x = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) U_{xi}; \quad U_y = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) U_{yi}; \quad U_z = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) U_{zi}. \quad (15)$$

Далее, имея три компоненты перемещений, можно вычислить перемещение по нормали в этой точке поверхности. Для

$$U_n = U_x \cos(\bar{n}, \bar{e}_1) + U_y \cos(\bar{n}, \bar{e}_2) + U_z \cos(\bar{n}, \bar{e}_3), \quad (16)$$

где направляющие косинусы вычисляются по формулам (11). Именно эти значения, вычисленные для точек, соответствующих узлам сетки КЭ гидродинамической зада-

стей). Перемещения любой точки грани КЭ можно вычислить по формулам

этого используются направляющие косинусы.

чи, используются в следующей итерации ее решения в качестве значений дополнительных зазоров (от упругой податливости деталей).

### Выводы

Рассмотрены алгоритмы снижения трудоемкости решения связанной УГД-задачи. Показано, что можно существенно снизить трудоемкость за счет следующих мероприятий: сгущения сеток и применения метода редуцирования, применения квазисовместных аппроксимаций, процедуры конденсации. Причем процедуру конденсации можно реализовать в экономичном алгоритме как неполную процедуру прямого хода в методе исключения Гаусса. В целом трудоемкость решения УГД-задачи может существенно снизиться.

Описана процедура приведения распределенных давлений к эквивалентной узловой нагрузке и приведены схемы численного интегрирования, обеспечивающие точное выполнение этих операций. Приведены формулы для передачи информации от ГД-задачи к упругой и наоборот. Для решения упругой задачи используются в качестве силовых граничных условий гидродинамические давления. Для решения ГД-задачи используются перемещения поверхностей в нормальном направлении в качестве дополнительных зазоров, учитываемых в следующей итерации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишин, А.В. Конечноэлементная методика расчета динамически нагруженных подшипников скольжения с учетом отклонений формы рабочей поверхности от цилиндрической / А.В.Мишин, М.В.Зернин // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2008. - № 2. – С. 43-54.
2. Зернин, М.В. Методика расчетной оценки предельных размеров дефектов поверхностей подшипников скольжения по критерию влияния их на параметры гидродинамики / М.В.Зернин, А.В.Мишин, Н.Н.Рыбкин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2013. - № 3. - С.14-23.
3. Рыбкин, Н.Н. Реализация методики расчетной оценки параметров гидродинамики подшипников скольжения с учетом радиальной податливости поверхностей / Н.Н.Рыбкин, М.В.Зернин// Вестник Брянского государственного технического университета. - 2013. - № 4. - С. 59-65.
4. Программа для ЭВМ «Bearing Builder Finite Element Method»/ А.В.Мишин, М.В.Зернин, Н.Н.Рыбкин, С.М.Шальго, В.В.Сопранцов. – Зарегистр. в Федер. службе по интел. собств. (Роспатент) 09.01.14, Свид. № 2014610341.
5. Зернин, М.В. Гидродинамический анализ подшипников скольжения. Ч. 1. Учет нецилиндричности рабочих поверхностей/ М.В.Зернин, А.В. Мишин, Н.Н.Рыбкин, С.В. Шилько //Трение и износ. – 2014. - Т. 35.- № 5.- С. 584-595.
6. Шабров, Н.Н. Метод конечных элементов в расчётах деталей тепловых двигателей/ Н.Н.Шабров. – Л.: Машиностроение, 1983. – 212 с.
7. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: [пер. с англ.] / О.Зенкевич, К.Морган.- М.: Мир, 1986.-318 с.
8. Зернин, М.В. Трехмерный конечный элемент для моделирования температурной, упругой и термоупругой составляющих в связанной задаче термоупругогидродинамики узлов трения / М.В.Зернин, Н.Н.Рыбкин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2016. - № 5. - С. 23-32.

9. Вороненко, Е.А. Метод редуцированных элементов для расчета конструкций / Е.А. Вороненко, О.М. Палий, С.В. Сочинский. - М.: Судостроение, 1990. - 224 с.
10. Рудаков, К.Н. UGS Femap 9.3. Геометрическое и конечноэлементное моделирование конструкций / К.Н. Рудаков. - М.: ДМК Пресс, 2009. - 296 с.
11. Гордон, Р. Аппроксимация эмпирически полученной поверхности методом наименьших квадратов / Р. Гордон. - Режим доступа: <http://elib.ispu.ru> (дата обращения: 20.02.2012).
12. Корнишин, М.С. Вычислительная геометрия в задачах механики оболочек / М.С. Корнишин, В.Н. Паймушин, В.Ф. Снигирев. - М.: Наука, 1989. - 208 с.
1. Mishin, A.V. Finite element procedure for computation of friction bearings loaded dynamically taking into account deviations of operation surface form from cylindrical one / A.V. Mishin, M.V. Zernin // *Assemblage in Mechanical Engineering and Instrument Making*. - 2008. - № 2. - pp. 43-54.
2. Zernin, M.V. Method for rated computation of surface defect limit dimensions for friction bearings on criterion of their impact upon hydrodynamics parameters / M.V. Zernin, A.V. Mishin, N.N. Rybkin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2013. - № 3. - pp. 14-23.
3. Rybkin, N.N. Realization of procedure for estimated parameters of friction bearing hydrodynamics taking into account surface radial flexibility / N.N. Rybkin, M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2013. - № 4. - pp. 59-65.
4. *Computer Program "Bearing Builder Finite Element Method"* / A.V. Mishin, M.V. Zernin, N.N. Rybkin, S.M. Shalygo, V.V. Soprantsev. - Registered in Federal Service of Intellectual Property. (Rospatent) 09.01.14, Certificate № 2014610341.
5. Zernin, M.V. Hydrodynamic analysis of friction bearings. Part 1. Registration of operation surface non-cyclicality / M.V. Zernin, A.V. Mishin, N.N. Rybkin, S.V. Shilko // *Friction and Wear*. - 2014. - Vol. 35. - № 5. - pp. 584-595.
6. Shabrov, N.N. *Finite Element Method in Computation of Heat-Engine Parts* / N.N. Shabrov. - L.: Mechanical Engineering, 1983. - pp. 212.
7. Zenkevich, O. *Finite Elements and Approximation*: [transl. from Engl.] / O. Zenkevich, K. Morgan. - M.: Mir, 1986. - pp. 318.
8. Zernin, M.V. 3 D finite element for simulation of temperature resilient and thermo-elastic constituents in coupled problem of friction unit thermodynamics / M.V. Zernin, N.N. Rybkin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2016. - № 5. - pp. 23-32.
9. Voronenok, E.A. *Reduced Element Method for Structure Computation* / E.A. Voronenok, O.M. Paly, S.V. Sochinsky. - M.: Shipbuilding, 1990. - pp. 224.
10. Rudakov, K.N. UGS Femap 9.3. *Geometrical and Finite Element Simulation of Structures* / K.N. Rudakov. - M.: DMK Press, 2009. - pp. 296.
11. Gordon, R. Approximation of surface obtained empirically by least-squares method / R. Gordon. - Access mode: <http://elib.ispu.ru> (Address date: 20.02.2012).
12. Kornishin, M.S. *Computational Geometry in Problems of Casing Mechanics* / M.S. Kornishin, V.N. Paimushin, V.F. Snigiryov. - M.: Science, 1989. - pp. 208.

Статья поступила в редколлегию 9.03.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Кеглин Б.Г.

#### Сведения об авторах:

**Зернин Михаил Викторович**, к.т.н., доцент кафедры «Информатика и программное обеспечение» Брянского государственного технического университета, e-mail: [zerninmv@mail.ru](mailto:zerninmv@mail.ru).

**Zernin Mikhail Victorovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Informatics and Software", Bryansk State Technical University, e-mail: [zerninmv@mail.ru](mailto:zerninmv@mail.ru).

**Рыбкин Николай Николаевич**, аспирант кафедры «Механика и ДПМ» Брянского государственного технического университета, e-mail: [mikolai@mks.ru](mailto:mikolai@mks.ru).

**Rybkin Nikolay Nikolayevich**, Post graduate student of the Dep. "Mechanics and DPM", Bryansk State Technical University, e-mail: [mikolai@mks.ru](mailto:mikolai@mks.ru).

УДК 621.941.08

DOI: 10.12737/article\_59b11cba898b73.823630

А.Ф. Денисенко, М.В. Якимов

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОПОРЫ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ЕЕ ЖЕСТКОСТЬ

Рассмотрена взаимосвязь между жесткостью опоры шпиндельного узла токарного станка в различных направлениях и ее температурными деформациями. Выполнен натурный эксперимент для оценки влияния процессов, связанных с нагревом станка, на анизотропию радиальной жесткости передней опоры шпиндельного узла токарного станка с оперативным программным управлением

SAMAT-400SC «Вектор». Установлена зависимость упругих деформаций передней опоры шпиндельного узла от нагрузки при нагреве для различных направлений.

**Ключевые слова:** опора шпиндельного узла, температурные деформации, анизотропия, жесткость, радиальная нагрузка.

A.F. Denisenko, M.V. Yakimov

## TEMPERATURE IMPACT OF SPINDLE UNIT BEARING UPON ITS STIFFNESS

The paper reports the interconnection between the stiffness of a lathe spindle unit bearing and its temperature deformations. A full-scale experiment for the impact assessment of the processes connected with lathe heating upon radial stiffness anisotropy of the spindle unit front bearing of on-line NC SAMAT-400SC "Vector" lathe is carried out. An elastic deformation dependence of spindle unit front bearing upon loading at heating for different directions is defined. The analysis of experimental data has shown that the anisotropy of spindle unit elements increases at heating and at the radial load increase; for a heated lathe a locus has no pronounced fractures and gets a regular form approaching ellipse. A computation of temperature deformations in the front wall of the headstock of

the lathe mentioned is carried out through the finite element method. The analysis of the form of temperature deformations of headstock body boring made it clear that a bearing bore obtains a deviation from circularity as an irregular ellipse. The results of the numerical experiment allowed substantiating the anisotropy presence of bearing stiffness at its heating and its orientation obtained during the full-scale experiment. The investigations carried out have shown that at lathe heating the anisotropy of spindle bearing stiffness formed at manufacturing and lathe assemblage increases, but bears a clearly directed character.

**Key words:** spindle unit bearing, temperature deformations, anisotropy, stiffness, radial load.

Общей тенденцией совершенствования современного технологического оборудования является рост производительности, реализуемый через увеличение скоростей как вращательных, так и поступательных движений, что делает динамический критерий обязательным при проектировании. Это требует использования динамических моделей, в максимальной мере учитывающих факторы, влияющие на динамику. Основным из этих факторов являются жесткостные характеристики.

Наиболее сложно учитываемой жесткостной характеристикой роторных систем является упругая характеристика опор.

В общем случае упругая характеристика опоры на подшипниках качения складывается из четырех составляющих:

- жесткость подшипника;

- жесткость корпуса;  
- жесткость соединения подшипника с корпусом;  
- жесткость соединения подшипника с валом.

Аналізу жесткостных характеристик подшипников качения посвящено большое количество работ [1 - 7].

Вторая составляющая требует учета особенностей конструкции опоры (наличие усиливающих ребер, бобышек, отверстий для подвода смазки, несимметричное расположение в корпусных деталях и др.). Особенно это актуально, когда рассматриваемая роторная система является составной частью более сложного механизма (например, шпиндель металлорежущего станка, смонтированный в шпиндельном

узле, содержащем целый ряд других механизмов).

Третья и четвертая составляющие в первую очередь зависят от качества сопрягаемых с подшипником посадочных цилиндрических поверхностей корпуса и вала, которые не могут быть идеальными, имеют погрешности (в том числе отклонения от круглости, величина которых определяется конструкцией корпуса и вала и технологией их изготовления).

Все это приводит к тому, что опоры ротора обладают неодинаковой жесткостью в различных направлениях, то есть анизотропией жесткости [8 - 10]. Причем в общем случае годографы упругих деформаций опор двухопорных роторных систем имеют разную ориентацию.

Кроме того, как для любого контакта, зависимость упругих деформаций соединения подшипника с корпусом и валом от приложенной нагрузки является нелинейной.

В то же время стоит отметить, что жесткость тесно связана с другими критериями работоспособности станка, в частности с тепловыми деформациями. Вследствие нагрева элементов и узлов оборудования происходят тепловые деформации, изменяются условия контактирования в соединениях станка и, как следствие, их жесткость.

Для подтверждения явления анизотропии жесткости и учета эксплуатационных условий, связанных с нагревом опоры, проводился натурный эксперимент по определению жесткости передней опоры ШУ токарного станка с оперативным программным управлением SAMAT-400SC «Вектор».

Нагружение шпинделя осуществлялось шагами по 250 Н в диапазоне нагрузок от 1250 до 2500 Н с помощью специального нагрузочного устройства с фиксацией значений радиальных перемещений шпинделя индикатором с ценой деления 1 мкм. Индикаторная стойка базировалась на передней стенке шпиндельной бабки (рис. 1).

Каждое нагружение повторялось от 3 до 6 раз. Итоговое значение принималось как среднее арифметическое полученных значений.

Направление действия силы изменялось посредством поворота оправки нагрузочного устройства в переходной втулке на угол  $45^\circ$ . Таким образом, для выполненного эксперимента выбрано восемь положений оправки (направлений действия силы на переднюю опору шпинделя) (рис. 1).

Эксперимент проводился в следующей последовательности:

1) нагрев станка в течение 1 часа на холостом ходу ( $n_{хол} = 2000$  об/мин);

2) определение упругих перемещений передней опоры ШУ на нагретом станке.

3) остывание станка в течение суток при неизменном угловом положении шпинделя;

4) определение жесткости передней опоры ШУ в двух направлениях на холодном станке при том же угловом положении шпинделя;

Средняя температура стенки шпиндельной бабки в районе передней опоры по восьми точкам по окружности составляла для холодного станка  $21,9^\circ\text{C}$ , для нагретого станка –  $56,7^\circ\text{C}$ .

Поскольку радиальная сила, действующая на шпиндель, по данной методике прикладывается практически в месте установки переднего подшипника, то деформацией задней опоры можно пренебречь и можно считать, что полученные упругие перемещения при экспериментах складываются из деформаций тела шпинделя и передней опоры. Таким образом, для полной оценки деформаций передней опоры полученные экспериментальные данные корректировались на величину упругих деформаций тела шпинделя, значения которых были получены расчетом методом конечных элементов [9]. Определенные таким образом упругие деформации передней опоры приведены в табл. 1 (для нагретого состояния станка) и табл. 2 (для холодного).



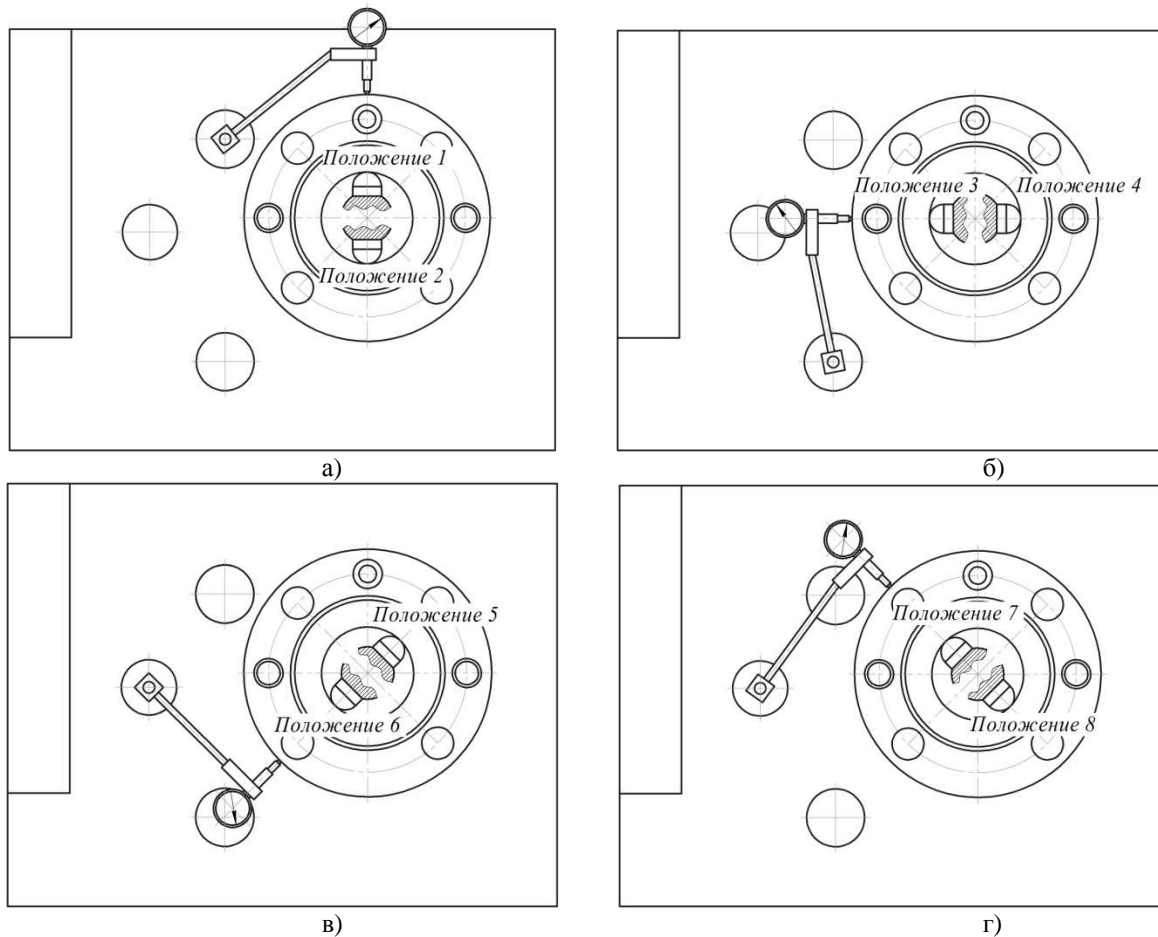


Рис. 1. Угловые положения нагрузочного устройства и средства контроля относительных перемещений шпинделя в радиальном направлении

Таблица 1

Деформация передней опоры ШУ после нагрева, мкм

Сила, Н	Положение оправки							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1250	3,6	4,2	4,8	5,5	6,5	7,1	3,6	4,2
1500	2,9	3,8	4,1	4,5	4,8	5,1	2,9	3,8
1750	3,6	4,2	4,8	5,5	5,8	6,8	3,6	4,2
2000	3,9	4,8	5,1	5,5	5,5	6,1	3,9	4,8
2250	5,2	6,2	6,8	7,1	7,8	8,5	5,2	6,2
2500	6,2	7,5	7,8	8,5	8,5	9,1	6,2	7,5

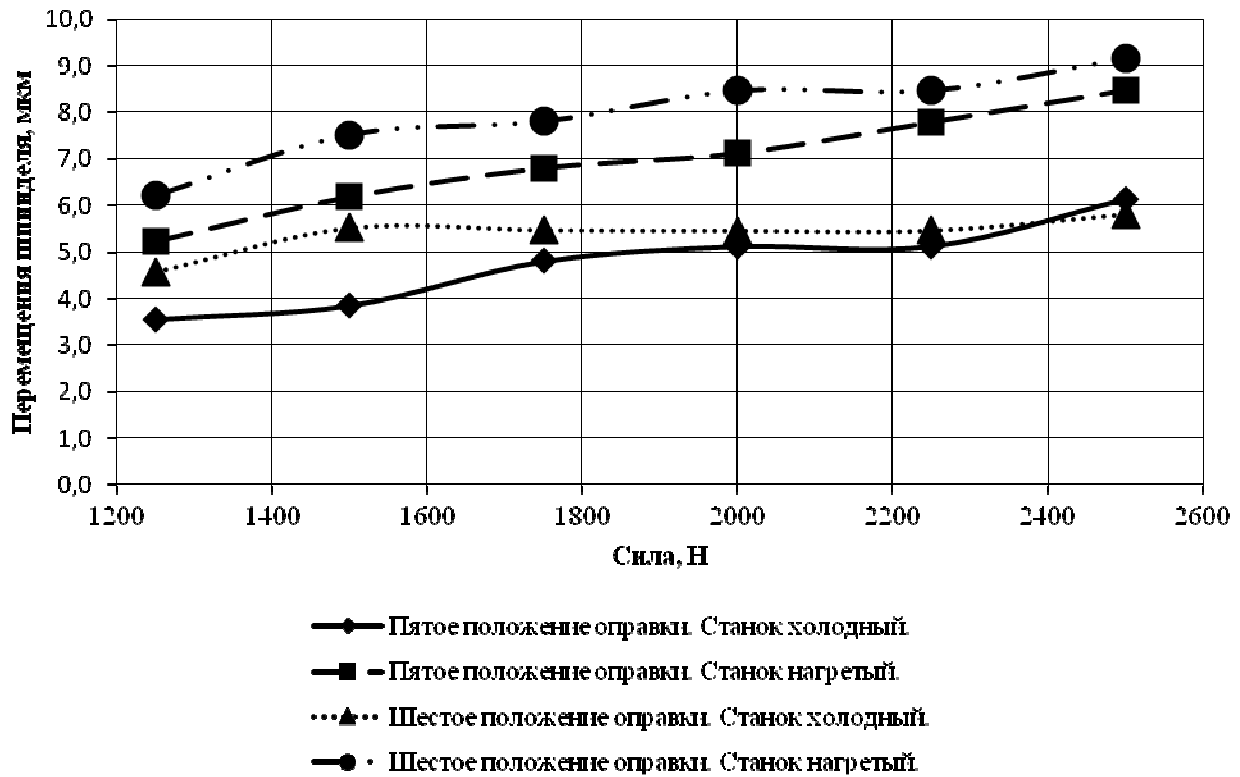
Таблица 2

Деформация передней опоры ШУ после остывания, мкм

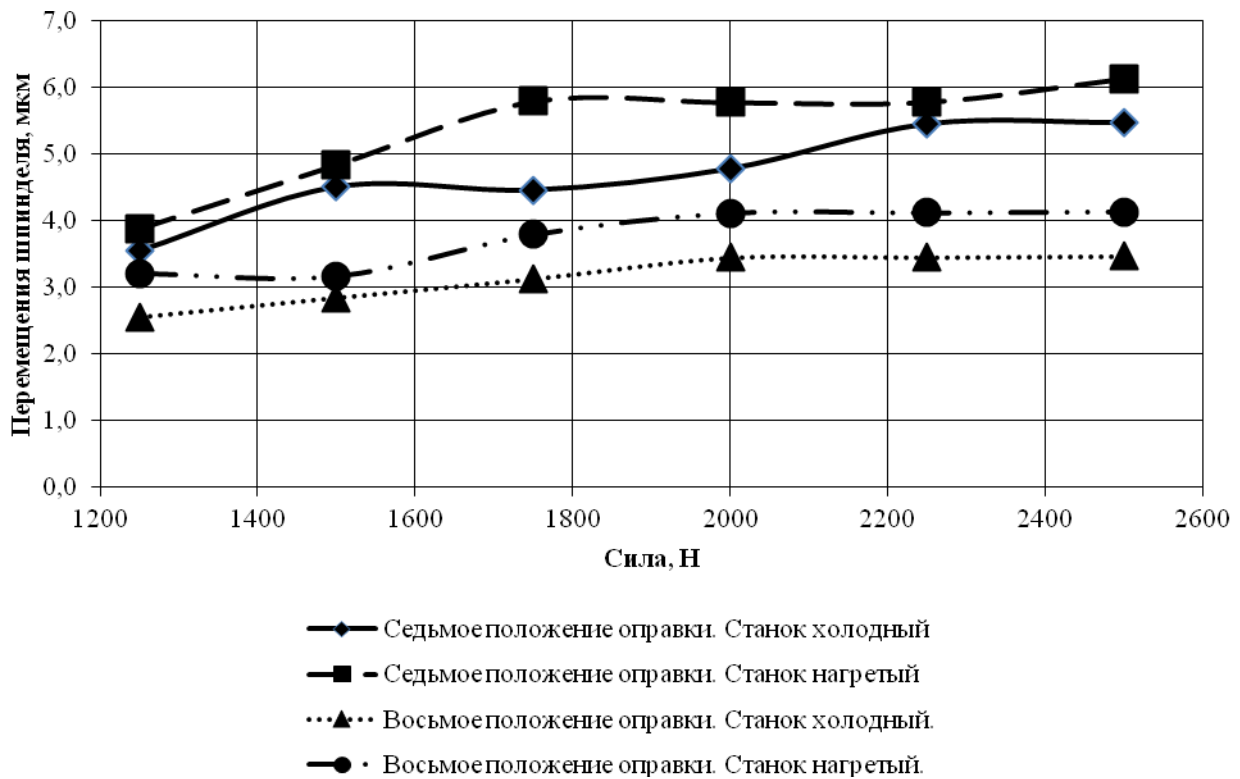
Сила, Н	Положение оправки							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1250	3,9	4,5	5,5	5,5	5,8	6,5	3,9	4,5
1500	2,2	2,8	3,5	3,5	3,5	3,5	2,2	2,8
1750	5,2	5,8	6,1	6,8	6,8	7,1	5,2	5,8
2000	0,6	0,8	1,5	1,5	1,5	1,5	0,6	0,8
2250	3,6	3,8	4,8	5,1	5,1	6,1	3,6	3,8
2500	4,6	5,5	5,5	5,5	5,5	5,8	4,6	5,5

На графиках, представленных на рис. 2, отображена зависимость упругих деформаций передней опоры от нагрузки для направлений, показывающих минимальное и максимальное изменения де-

формаций при нагреве. Следует отметить, что эти направления соответствуют положениям 5-6 и 7-8 соответственно и являются взаимно перпендикулярными.



а)



б)

Рис. 2. Графики упругих перемещений передней опоры под действием направленной нагрузки для нагретого и холодного станка

На основании данных табл. 1 и 2 были построены также годографы деформаций опоры шпиндельного узла для нагре-

того и холодного состояний станка (рис. 3).

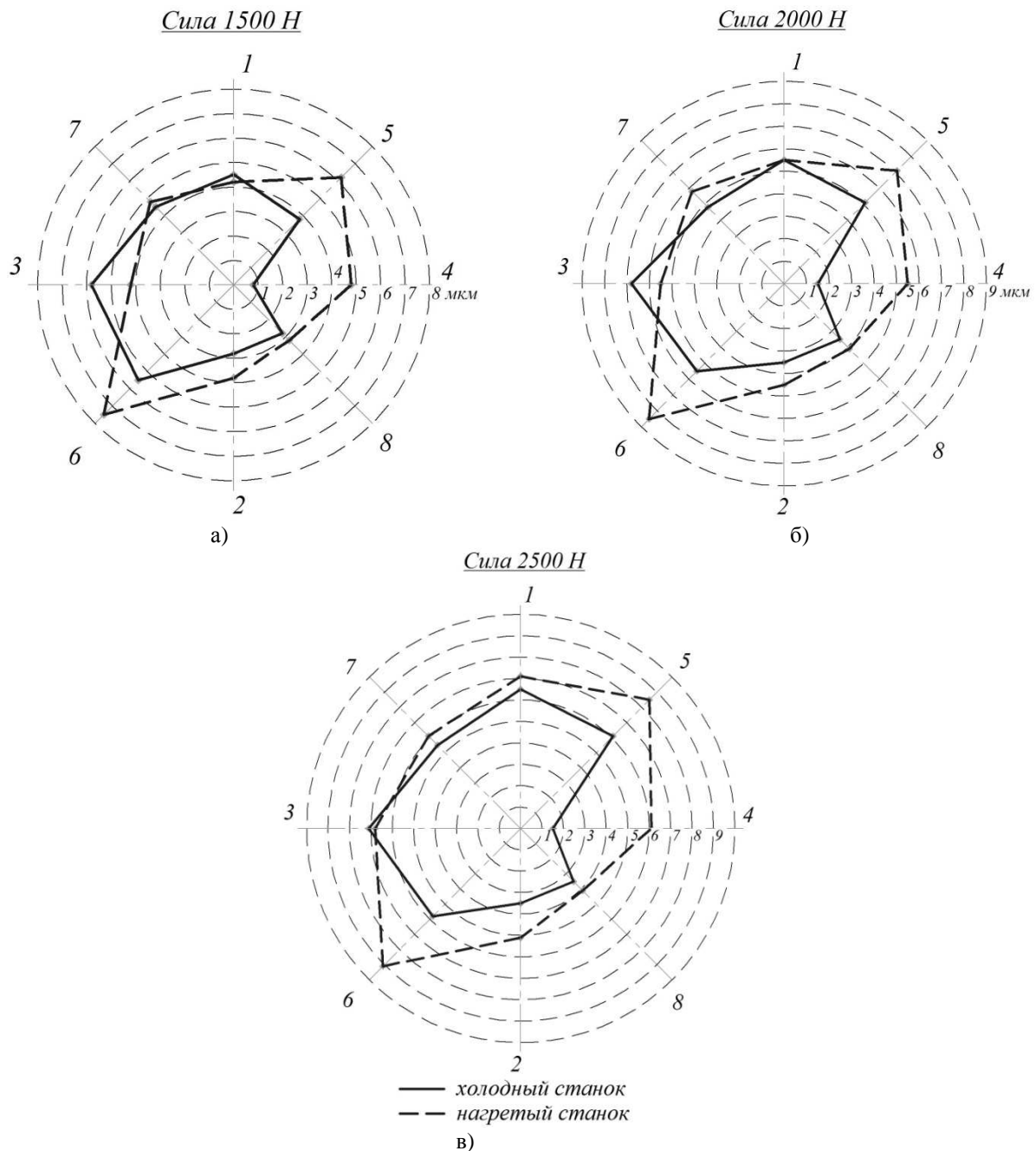


Рис. 3. Годографы упругих перемещений передней опоры под действием направленной нагрузки для нагретого и холодного станка

Анализируя экспериментальные данные, приведенные в табл. 1 и 2 и на рис. 2 и 3, можно сделать вывод, что анизотропия упругих деформаций опоры, проявляющаяся на холодном станке, увеличивается при нагреве и при возрастании радиальной нагрузки; для нагретого станка годограф не имеет ярко выраженных изломов (что

характерно для непрогретого станка) и становится правильной формы, приближающейся к эллипсу.

При этом для всех рассматриваемых условий максимальные упругие перемещения наблюдаются по направлению 5-6, а минимальные - по направлению 7-8.

Было предположено, что в процессе нагрева стенки передней опоры шпинделя отклонения от круглости, полученные при расточке отверстия в корпусе под передний подшипник, существенно увеличиваются.

С целью подтверждения данной гипотезы был выполнен расчет температурных деформаций передней стенки шпиндельной бабки.

На первом этапе на основе конструкторской документации была создана 3D-модель корпуса шпиндельной бабки токарного станка SAMAT-400SC «Вектор».

Для учета изменения температуры по окружности расточки, что было отмечено при экспериментах, при численном моделировании в расточке под передний подшипник шпинделя было установлено кольцо, состоящее из 32 сегментов и равное по размеру наружному кольцу подшипника. Это позволило приложить разные по величине температурные нагрузки по окружности расточки.

Расчет температурных деформаций проводился в ANSYS Workbench в два этапа: 1) расчет температурных полей; 2) расчет температурных деформаций на основе результатов, полученных на первом этапе.

При расчете температурных полей к сегментам кольца прикладывались температурные нагрузки (рис. 4), равные по величине температурам, полученным в ходе натурального эксперимента (табл. 3). Номера измерительных точек совпадали с направлениями действия радиальной нагрузки, прикладываемой при экспериментальной оценке упругих деформаций опоры.

Предполагается, что каждой паре соседних сегментов задается одна температура. Таким образом, 16 сегментов имеют температуры, равные соответствующим температурам измерительных точек. Промежуточные пары сегментов получили температуры, рассчитанные как среднее арифметическое температур предшествующей и последующей пар сегментов (рис. 4).

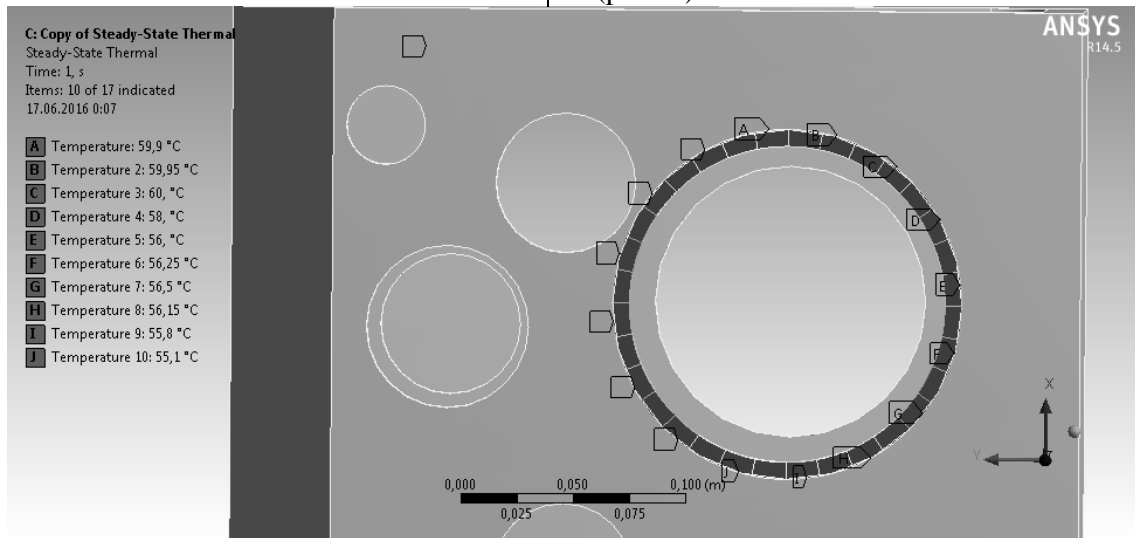


Рис. 4. Приложение температурных нагрузок к сегментному кольцу

Таблица 3

Температура шпиндельной бабки в районе передней опоры

Измерительные точки	1	2	3	4	5	6	7	8
Температура, °C	59,9	55,8	54,9	56	60	54,4	56,1	56,5

Теплопередача между корпусом шпиндельной бабки и окружающей средой (22 °C) задавалась через конвекцию и коэффициент теплопередачи, равный 5,7 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

По результатам расчета получено распределение температур по корпусу шпиндельной бабки, которые использовались как начальные условия для расчета температурных деформаций (табл. 4). На

основе этих данных построены формы температурных деформаций расточки под переднюю опору (рис. 5). Для наглядности на рисунке в условном масштабе также показано номинальное положение отверстия под подшипник ( $D_{ном} = 140$  мм).

Анализируя форму температурных деформаций расточки, можно сделать вывод, что посадочное отверстие под подшипник получает дополнительное отклонение от круглости в виде неправильного эллипса, вытянутого в направлении 5-6.

Таблица 4

Температурные деформации в опорных точках расточки шпиндельной бабки под переднюю опору

Опорные точки	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta x$ , мкм	-1,2	2,1	-25	32	20	-16,5	-19,8	23
$\Delta y$ , мкм	94,9	50,6	69,7	71,1	87,2	54,6	86,4	56,7

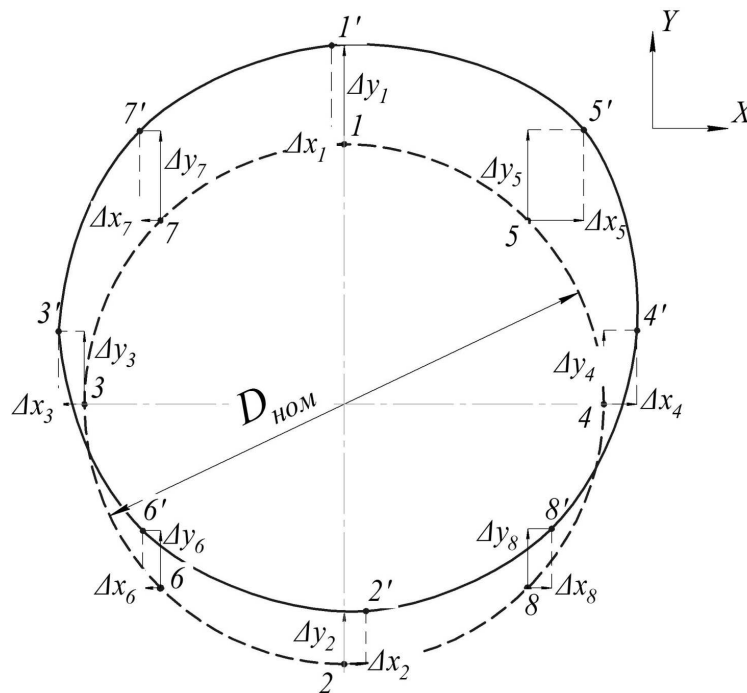


Рис. 5. Форма температурных деформаций расточки шпиндельной бабки под переднюю опору

Таким образом, результаты численного эксперимента объясняют увеличение анизотропии жесткости опоры при ее нагреве и ее ориентацию, полученные при натурном эксперименте (рис. 3).

Проведенные исследования показали, что при нагреве станка анизотропия

жесткости шпиндельной опоры, формируемая при изготовлении и сборке станка, увеличивается и носит четко ориентированный характер, что позволяет прогнозируемо учесть ее влияние на динамические процессы ШУ при его эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дегтярев, С.А. Учет контактных взаимодействий при моделировании жесткостных свойств роликовых подшипников / С.А. Дегтярев, М.Н. Кутаков, М.К. Леонтьев, В.В. Попов, Ю.С. Ромашин // Вестник Московского авиационного института. - 2015. - Т. 22. - № 2. - С. 137-141.
2. Леонтьев, М.К. Нелинейные модели подшипников качения в роторной динамике / М.К. Леонтьев, Е.И. Снеткова // Вестник Московского авиационного института. - 2012. - Т. 19. - № 2. - С. 134-145.
3. Кикоть, Н.В. Анализ динамических характеристик подшипников качения в опорах роторов / Н.В. Кикоть, Е.И. Снеткова, М.К. Леонтьев, С.А. Дегтярев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии

- им. П.А. Соловьева. - 2012. - № 2 (23). - С. 94-102.
4. Леонтьев, М.К. Динамика ротора в подшипниках качения / М.К. Леонтьев, В.А. Карасев, О.Ю. Потапова, С.А. Дегтярев // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. - 2006. - № 4. - С. 40.
  5. Бейзельман, Р.Д. Подшипники качения: справочник / Р.Д. Бейзельман, Б.В. Цыпкин, Л.Я. Перель. - М.: Машиностроение, 1975. - 572 с.
  6. Денисенко, А.Ф. Формирование точностных и жесткостных характеристик опор роторного узла при сборке / А.Ф. Денисенко, М.В. Якимов // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. - 2009. - Вып. 3 (25). - С. 132-139.
  7. Денисенко, А.Ф. Разработка конечноэлементной модели для определения упругих характеристик

1. Degtyaryov, S.A. Contact interactions account at simulation of stiffness properties of roller bearings / S.A. Degtyaryov, M.N. Kutakov, M.K. Leontiev, V.V. Popov, Yu.S. Romashin // *Bulletin of Moscow Aircraft Institute*. - 2015. - Vol. 22. - № 2. - pp. 137-141.
2. Leontiev, M.K. Non-linear models of frictionless bearings in rotor dynamics / M.K. Leontiev, E.I. Snetkova // *Bulletin of Moscow Aircraft Institute*. - 2012. - Vol. 19. - № 2. - pp. 134-145.
3. Kikot, N.V. Analysis of frictionless bearing dynamic characteristics in rotor bearings / N.V. Kikot, E.I. Snetkova, M.K. Leontiev, S.A. Degtyarev // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technological Academy of Rybinsk*. - 2012. - № 2 (23). - pp. 94-102.
4. Leontiev, M.K. Rotor dynamics in frictionless bearings / M.K. Leontiev, V.A. Karasyov, O.Yu. Potapova, S.A. Degtyaryov // *Machine Vibration: Measurement, Decrease, Protection*. - 2006. - № 4. - pp. 40.
5. Beizelman, R.D. *Frictionless Bearings: Reference Book* / R.D. Beizelman, B.V. Tsypkin, L.Ya. Perel. - М.: Mechanical Engineering, 1975. - pp. 572.

шпиндельных узлов / А.Ф. Денисенко, М.В. Якимов // СТИН. - 2011. - № 8. - С. 9-13.

8. Денисенко, А.Ф. Моделирование опоры качения при конечноэлементном анализе шпиндельных узлов металлорежущих станков / А.Ф. Денисенко, М.В. Якимов // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. - 2012. - № 3 (35). - С. 126-132.
9. Левина, З.М. Контактная жесткость машин / З.М. Левина, Д.Н. Решетов. - М.: Машиностроение, 1971. - 264 с.
10. Денисенко, А.Ф. Учет анизотропии упругих свойств передней опоры шпиндельного узла токарного станка при изготовлении деталей приборов / А.Ф. Денисенко, М.В. Якимов // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. - 2015. - № 3 (47). - С. 91-99.

6. Denisenko, A.F. Formation of accuracy and stiffness characteristics of rotor unit bearings at assembling / A.F. Denisenko, M.V. Yakimov // *Bulletin of Samara State Technical University. Engineering sciences*. - 2009. - Issue. 3 (25). - pp. 132-139.
7. Denisenko, A.F. *Development of Finite-Element Model for Elastic Characteristics Definition of Spindle Units* / A.F. Denisenko, M.V. Yakimov // СТИН. - 2011. - № 8. - pp. 9-13.
8. Denisenko, A.F. Frictionless Bearing Simulation at Finite-Element Analysis of Machine-Tool Spindle Units / A.F. Denisenko, M.V. Yakimov // *Bulletin of Samara State Technical University. Engineering Sciences*. - 2012. - № 3 (35). - pp. 126-132.
9. Levina, Z.M. *Machine Contact Stiffness* / Z.M. Levina, D.N. Reshetov. - М.: Mechanical Engineering, 1971. - pp. 264.
10. Denisenko, A.F. Anisotropy account of front bearing elastic properties in lathe spindle unit at manufacturing device parts / A.F. Denisenko, M.V. Yakimov // *Bulletin of Samara State Technical University. Engineering Sciences*. - 2015. - № 3 (47). - pp. 91-99.

Статья поступила в редколлегию 5.05.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П.Н.Лебедева Ярьско С.И.

#### Сведения об авторах:

**Денисенко Александр Федорович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные станочные и инструментальные системы» Самарского государственного технического университета, e-mail: [ask@samgtu.ru](mailto:ask@samgtu.ru).

**Denisenko Alexander Fedorovich**, doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Automated Machine Tools and Instrumental Systems», e-mail: [ask@samgtu.ru](mailto:ask@samgtu.ru).

**Якимов Михаил Владимирович**, ст. преподаватель кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы» Самарского государственного технического университета, e-mail: [mikya@yandex.ru](mailto:mikya@yandex.ru).

**Yakimov Mikhail Vladimirovich**, senior lecturer of the department «Automated machining and tool systems», e-mail: [mikya@yandex.ru](mailto:mikya@yandex.ru).

УДК 621.753.4, 621.7.077, 621.83

DOI: 10.12737/article\_59b11cb86cfa41.94680975

Н.Д. Феофилов, Е.С. Янов, А.С. Ямников

## ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ВО ВРЕМЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрены вопросы, связанные с конструктивными особенностями различных разработанных и изготовленных приспособлений для крепления экспериментальных образцов на зубофрезерных станках во время силовых и стойкостных исследований. Рассмотрены способы установки и

крепления как экспериментальных образцов, так и приспособлений.

**Ключевые слова:** эксперимент, сборная червячная фреза, зубчатая рейка, приспособление, конструкция, образец.

N.D. Feofilov, E.S. Yanov, A.S. Yamnikov

## DEVICES FOR SAMPLE FASTENING DURING EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

The paper reports the consideration of problems connected with design peculiarities of devices for sample fastening on gear-milling machines during the investigation fulfillment of a gear milling process of cylindrical wheels with combined hob milling cutters. The essence of the problem is reduced to that the fulfillment of investigations directed to the definition of a hob durability term and also of the modes and a force of cutting upon real large cog-wheels is not always possible as on domestic engineering enterprises they are manufactured mostly with small-lot or limited production and their price is high. Therefore, it is offered

to substitute expensive and long experiments for experiments with special samples. In the paper there are described designs and circuits of the installation of the devices developed for such samples. In conclusion there are shown test results and is made a conclusion of that the use of the devices offered allowed defining and correcting tool parameters, cutting modes, defining a tool durability period at the stage of technological pre-production of manufacturing large cog-wheels made of hardened steel.

**Key words:** experiment, combined hob milling cutter, toothed rack, device, design, sample.

### Введение

В различных отраслях машиностроения используется большое количество деталей, имеющих повторяющийся с постоянным шагом зубчатый профиль, а именно: зубчатые и храповые колеса, шлицевые валы, звездочки цепных передач и другие. Поэтому на кафедре технологии машиностроения ТулГУ на протяжении многих лет ведутся исследования, направленные на совершенствование технологии зубообработки, в рамках научной школы, основанной И.А. Когановым [1-7].

Проведение силовых исследований и исследований, направленных на определение периода стойкости или ресурса инструмента, например червячных фрез, а также режимов и силы резания, на натуральных крупногабаритных зубчатых колесах не всегда представляется возможным, так как на отечественных машиностроительных предприятиях они в большинстве своем изготавливаются мелкосерийно или единично и их стоимость высока [8].

### Методика эксперимента

Исследования, основанные на программах, использующих МКЭ, не всегда с требуемой точностью отражают реальные процессы и их развитие, если не имеют под собой исходных данных, полученных при проведении натуральных экспериментов. Поэтому для решения вопросов, связанных с экспериментами на крупногабаритных

колесах, в качестве экспериментальных образцов предложено использовать фрагменты сталей, из которых изготавливаются колеса, или сталей, близких по твердости и физико-химическим свойствам.

Ширина экспериментальных образцов может варьироваться в зависимости от типа исследования. Например, для измере-

ния сил резания можно использовать как образцы шириной, равной величине осевого шага инструмента (с учетом радиусов округления фрезы), так и образцы, ширина которых равна длине активной линии зацепления, однако общие принципы их крепления остаются неизменными.

Для одного из вариантов крепления образцов разработано и изготовлено при-

способление из стали 40X (ГОСТ 1050-74), закаленной до 42 - 46 HRC, которое состоит из трех основных элементов: двух брусков с пазами и П-образной стойки с отверстием для крепления оправки токосъемного узла, предназначенного для передачи сигнала от динамометра к регистрирующей и анализирующей аппаратуре (рис. 1) [9].

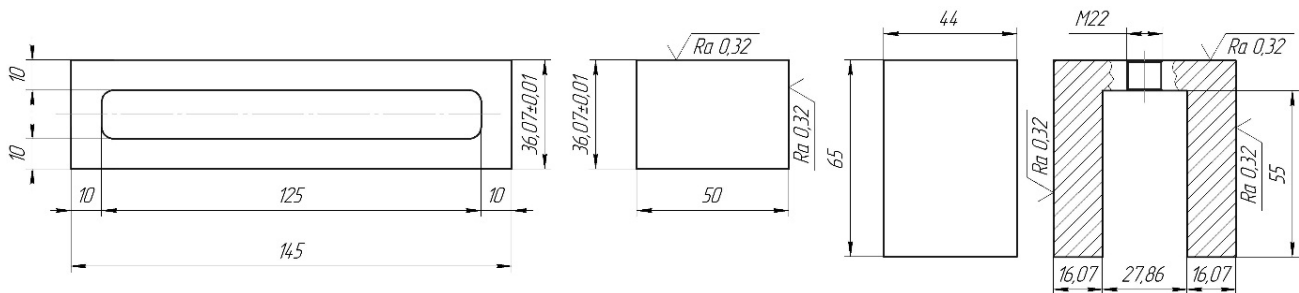


Рис. 1. Конструкция составных частей приспособления

Бруски выполнены шириной, позволяющей разместить между ними экспериментальный образец 4 с минимальным зазором (для регулирования вылета образца), и установлены на фрезерный столик 6 универсального динамометра УДМ 1200 7,

зафиксированного на столе зубофрезерного станка 5К32А 5. В пазы брусков вставлена П-образная стойка, выполняющая роль вертикального упора, с ввинченной в нее оправкой токосъемника 2 (рис. 2).

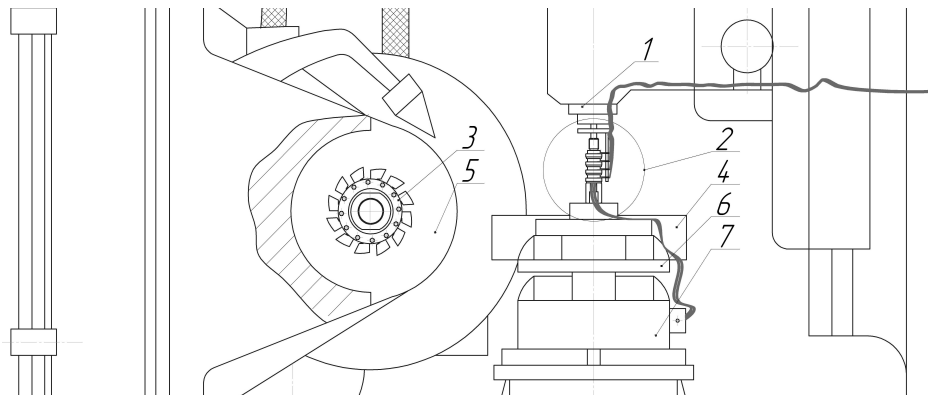


Рис. 2. Эскиз приспособления для закрепления образцов, имитирующих одну впадину зубчатого колеса

Экспериментальный образец базируется на фрезерном столике динамометра УДМ 1200 и по боковым поверхностям брусков, а затем прижимается контрподдержкой через П-образную стойку и винтами по бокам. Базовой поверхностью является торец фрезерного столика. От него измеряется величина вылета заготовки, которая с учетом половины ширины фрезерного столика соответствует радиусу имитируемого зубчатого колеса.

Динамометр УДМ 1200 установлен на столе станка с погрешностью радиаль-

ного биения, не превышающей 0,02 мм.

Перед началом опыта пластина выдвигается на расстояние от торца фрезерного столика динамометра, имитирующее зубчатое колесо требуемого диаметра.

Во время опыта однозаходный червяк червячной фрезы 3 при вращении последовательно контактирует со всеми зубьями колеса. Поэтому каждая впадина обрабатывается всеми зубьями однозаходной фрезы, расположенными на длине активной части ее линии зацепления. При вращении фрезы каждая режущая кромка



описывает кольцевую траекторию, при этом траектории отдельных зубьев смещены вдоль оси фрезы соответственно винтовому расположению зубьев. Режущие зубья при обработке располагаются во впадине колеса по касательным к его теоретическому профилю. Точки касания соответствуют точкам линии профилирования.

Количество режущих кромок с каждой стороны на один виток равно количеству зубьев фрезы по окружности. Число резов увеличивается с повышением числа зубьев колеса, уменьшением угла профиля фрезы и уменьшается с увеличением числа заходов фрезы.

Количество резов, образующих профиль колеса, может быть недостаточным, тогда образуется огранка. Полученные отклонения невелики и не оказывают существенного влияния на зацепление [10].

После завершения каждого опыта отрезалась часть образца с прорезанной впадиной, а затем он выдвигался в исходное положение, чтобы обеспечить требуемый диаметр имитируемого колеса.

На базе рассмотренного приспособления также есть возможность проводить исследования на целых зубчатых колесах, для чего предусмотрена оправка со специальным основанием (рис. 3). Основание, в котором сделано отверстие с резьбой, устанавливается на фрезерный столик 6 диаметра УДМ 1200 7 и фиксируется винтами без возможности смещения. По резьбе устанавливается оправка 5, на которой имеется выступ для установки заготовки зубчатого колеса 4, прижимаемой при помощи гайки. Также в оправке имеется паз-канавка для прокладки проводов токосъемного узла, чтобы избежать попадания проводов в зону резания.

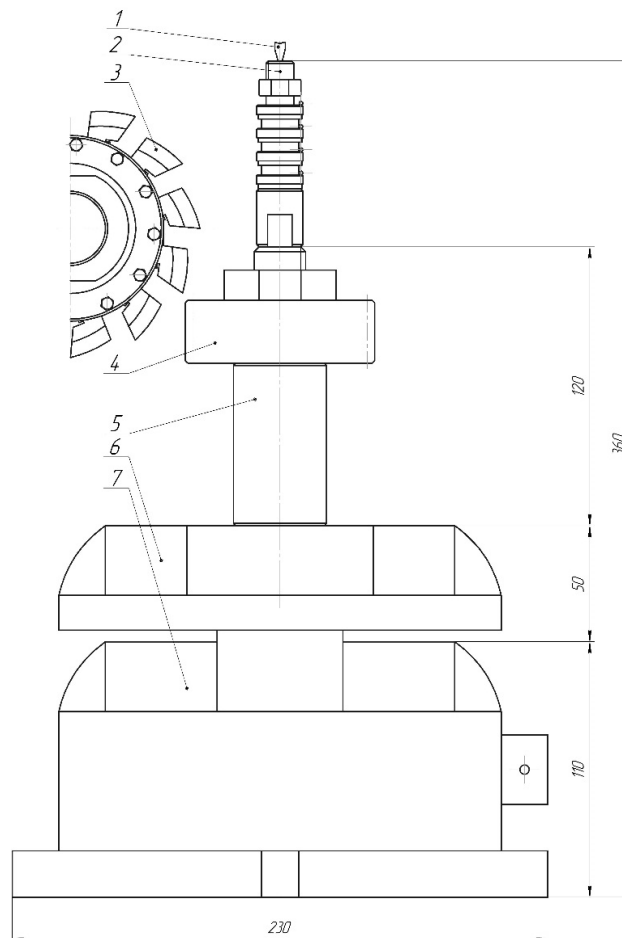


Рис. 3. Эскиз приспособления для закрепления образцов, имитирующих целое зубчатое колесо

Для случая, когда изготовить пластину из исследуемого материала не представляется возможным, предложен следующий вариант приспособления для закрепления экспериментальных образцов (рис. 4).

Приспособление изготовлено из стали 40Х (ГОСТ 1050-74), закаленной до 43-45 HRC, и представляет собой пластину-основание с прихватом. Конструктивные особенности позволяют закреплять экспериментальные образцы шириной в пределах активной линии зацепления без возможности смещения.

Приспособление устанавливается на фрезерный столик универсального динамометра УДМ – 1200, на него устанавливаются два бруска с пазами и П-образная стойка (рис. 1). Исследуемый образец зажимается между двумя передними стойками при помощи винтов и дополнительно сверху крышкой - пластиной, также имеющей возможность фиксации образца при помощи винтов. Такая конструкция позволяет увеличить силу прижима образца, но недостатком является ограниченная высотой стоек высота исследуемых образцов.



Рис. 4. Приспособление для закрепления образцов

Апробация и испытания приспособлений были проведены при силовых и стойкостных исследованиях процесса зубофрезерования цилиндрических колес с модулем  $m = 2,75 \text{ мм}$  и числом зубьев  $z_1 = 112$  при продольной подаче  $S_0 = 1 - 4 \text{ мм/об}$  и скорости резания

$V = 30 - 50 \text{ м/мин}$  при встречном фрезеровании сборной червячной фрезой диаметром  $d_{a0} = 110,4 \text{ мм}$  с передним углом  $\gamma_a = 5^\circ$  и рейками из стали Р6М5 как единичной впадины, так и целого колеса (рис. 5).



Рис. 5. Общий вид приспособления для закрепления образцов во время проведения эксперимента

## Заключение

Результаты, полученные в ходе исследований с использованием предложенных приспособлений, позволили на этапе технологической подготовки производства крупногабаритных зубчатых колес из закаленных сталей в действующих технологических процессах определить и скорректировать параметры инструмента, режимы резания, определить период стойкости инструмента.

Образцами при исследовании составляющих сил резания являлись пластины из сталей 40X (ГОСТ 1050-74) и СтЗсп

(ГОСТ 380-2005) с размерами 255x55x8,1 мм и твердостью 220 - 350 НВ.

Следует отметить, что как приспособления, так и исследовательский комплекс в целом обладают модульностью и мобильностью, позволяющей при необходимости перемещать их между зубофрезерными станками, чтобы обеспечить максимальную достоверность результатов для каждого случая в условиях действующего технологического процесса нарезания зубчатых колес.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямников, А.С. И.А. Коганов и тульская научная школа технологов / А.С. Ямников // Известия ТулГУ. Технические науки. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. - Вып. 8. - Ч. 1. - С. 20-26.
2. Malikov, A.A. Simplified calculation of the initial rack profile in tooth-shaping mills / A.A. Malikov, A.S. Yamnikov, Yu.N. Fedorov, O.L. Zolotukhina // Russian Engineering Research. - 2008. - Vol. 28. - № 10. - P. 1015-1017.
3. Malikov, A.A. Cutting and plastic deformation in the shaving and rolling of cylindrical gears with round teeth / A.A. Malikov, A.V. Sidorkin, A.S. Yamnikov // Russian Engineering Research. - 2013. - № 33 (6). - P. 363-366.
4. Yamnikov, A.S. Grinding circular cylindrical-gear teeth of with planetary motion of the wheel axis / A.S. Yamnikov, G.M. Sheinin, M.N. Bobkov // Russian Engineering Research. - 2008. - № 28 (5). - P. 485-488.
5. Ямников, А.С. Интенсификация комплексной зубообработки цилиндрических колес / А.С. Ямников, Ю.Н. Федоров, В.Д. Артамонов, К.В. Филиппов // СТИН. - 2002. - № 4. - С. 10-12.
6. Ямников, А.С. Повышение эффективности зубообработки цилиндрических колес / А.С. Ямников, Ю.Н. Федоров, В.Д. Артамонов // СТИН. - 2000. - № 10. - С. 38-40.
7. Ямников, А.С. Прогрессивная технология изготовления цилиндрических зубчатых колес / А.С. Ямников, Ю.Н. Федоров, В.Д. Артамонов // Технология машиностроения. - 2000. - № 3. - С. 11-13.
8. Феофилов, Н.Д. Установка для проведения силовых исследований операции зубофрезерования / Н.Д. Феофилов, Е.С. Янов // Известия ТулГУ. Технические науки. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. - Вып. 11. - Ч. 1. - С. 184-189.
9. Использование 3D-принтеров для прототипирования деталей изоляторов токосъемных узлов / А.А. Маликов, Н.Д. Феофилов, А.В. Сидоркин, Е.С. Янов // Известия ТулГУ. Технические науки. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. - Вып. 8. - Ч. 1. - С. 17-23.
10. Янов, Е.С. Влияние взаимодействия зубьев червячной фрезы на суммарную силу резания / Е.С. Янов // Известия ТулГУ. Технические науки. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. - Вып. 8. - Ч. 1. - С. 260-264.
1. Yamnikov, A.S. I.A. Koganov and Scientific School of Technologists of Tula / A.S. Yanikov // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences*. - Tula: Publishing House of TulaSU, 2016. - Edition 8. - Part 1. - pp. 20-26.
2. Malikov, A.A. Simplified calculation of the initial rack profile in tooth-shaping mills / A.A. Malikov, A.S. Yamnikov, Yu.N. Fedorov, O.L. Zolotukhina // Russian Engineering Research. - 2008. - Vol. 28. - № 10. - P. 1015-1017.
3. Malikov, A.A. Cutting and plastic deformation in the shaving and rolling of cylindrical gears with round teeth / A.A. Malikov, A.V. Sidorkin, A.S. Yamnikov // Russian Engineering Research. - 2013. - № 33 (6). - P. 363-366.
4. Yamnikov, A.S. Grinding circular cylindrical-gear teeth of with planetary motion of the wheel axis / A.S. Yamnikov, G.M. Sheinin, M.N. Bobkov // Russian Engineering Research. - 2008. - № 28 (5). - P. 485-488.
5. Yamnikov, A.S. *Intensification of Complex Gear Machining of Cylindrical Wheels* / A.S. Yamnikov, Yu.N. Fedorov, V.D. Artamonov, K.V. Filippov // STIN. - 2002. - № 4. - pp. 10-12.
6. Yamnikov, A.S. *Efficiency Increase of Gear Machining in Cylindrical Wheels* / A.S. Yamnikov, Yu.N. Fedorov, V.D. Artamonov // STIN. - 2000. - № 10. - pp. 38-40.

7. Yamnikov, A.S. Efficient technology of cylindrical cog-wheel production / A.S. Yamnikov, Yu.N. Fedorov, V.D. Artamonov // *Engineering Techniques*. - 2000. - № 3. - pp. 11-13.
8. Feofilov, N.D. Plant for carrying out power investigations of gear milling / N.D. Feofilov, E.S. Yanov // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences*. - Tula: Publishing House of TulaSU, 2014. - Edition 11. - Part 1. - pp. 184-189.
9. 3D printer use for prototyping of insulator parts in current-collecting units / A.A. Malikov, N.D. Feofilov, A.V. Sidorkin, E.S. Yanov // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences*. - Tula: Publishing House of TulaSU, 2015. - Edition 8. - Part 1. - pp. 17-23.
10. Yanov, E.S. Impact of hob teeth interaction upon total cutting force / E.S. Yanov // *Proceedings of TulaSU. Engineering sciences*. - Tula: Publishing House of TulaSU, 2016. - Edition 8. - Part 1. - pp. 260-264.

*Статья поступила в редколлегию 26.06.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Тульского государственного университета  
Борискин О.И.*

#### Сведения об авторах:

**Феофилов Николай Дмитриевич**, д.т.н., профессор Тульского государственного университета, e-mail: [feofilovnd@yandex.ru](mailto:feofilovnd@yandex.ru).

**Янов Евгений Сергеевич**, инженер службы инновационного развития АО «НПО «СПЛАВ», Тел. +7-910-942-05-92, e-mail: [dexaik@mail.ru](mailto:dexaik@mail.ru).

**Feofilov Nikolay Dmitrievich**, D. Eng., Prof., State University of Tula, e-mail: [feofilovnd@yandex.ru](mailto:feofilovnd@yandex.ru).

**Yanov Yevgeny Sergeevich**, Engineer of Innovation Development Service J-S Co “SPA “ALLOY”, e-mail: [dexaik@mail.ru](mailto:dexaik@mail.ru).

**Ямников Александр Сергеевич**, д.т.н., профессор Тульского государственного университета, Тел. +7-910-941-30-11, e-mail: [YamnikovAS@mail.ru](mailto:YamnikovAS@mail.ru).

**Yamnikov Alexander Sergeevich**, D. Eng., Prof., State University of Tula, e-mail: [YamnikovAS@mail.ru](mailto:YamnikovAS@mail.ru)

УДК 621.02.001.63

DOI: 10.12737/article\_59b11cb7aa8348.2704385

С.В. Ходыревская, А.А. Горохов, О.Г. Куц, Ю.А. Мальнева

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕЖУЩИХ КРОМОК СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН СБОРНЫХ ФАСОННЫХ ФРЕЗ

Приведен метод аналитического представления режущих кромок сменных многогранных пластин, применяемых в конструкциях сборных фрез, в виде векторных функций: радиуса-вектора режу-

щей кромок, векторов нормали к передней и задней поверхностям.

**Ключевые слова:** сменные многогранные пластины, сборные фасонные фрезы, модель режущей кромок.

S.V. Khodyrevskaya, A.A. Gorokhov, O.G. Kuts, Yu. A. Malneva

## CUTTING EDGE ANALYTICAL DESCRIPTION OF REPLACEABLE INDEXABLE INSERTS OF COMPOUND FORM CUTTERS

The formation of the efficient methods for assessed parameters computation is impossible without a mathematical description of cutting edges of replaceable inserts (RII), its front surface and an end flank. The most expedient way is supposed to be the fulfillment of an analytical description of RII cutting edges by means of the vector functions set: by the function of cutting edge radius-vector; by the function of the vector of normal to a front surface; by the function of the vector of normal to an end flank. The given description was considered by the example of some forms and plates formation (according to SRS 19042-80) used in the designs of compound form cutters, to

wit: of equilateral and equiangular inserts with a radius at the tops; round; rhombic; triangular with faces at the tops. The realization of the given functions in Maple system allowed carrying out the simulation and a geometrical presentation of cutting edges of the RIIs under consideration. The analysis of the results obtained allowed drawing a conclusion of the adequacy of functions obtained which makes it possible to use them at the creation and development of CAD/CAM systems of compound form cutters.

**Key words:** replaceable indexable inserts, compound form cutters, model of a cutting edge.

Существующие в настоящее время методы проектирования сборных фасонных фрез в основном сводятся к созданию различных моделей и алгоритмов, описывающих как конструкцию фрезы, так и сам процесс фрезерования. Будущий образ проектируемых фрез во многом определяется конструкторскими решениями, при этом основным оценочным критерием является величина погрешности аппроксимации обрабатываемого профиля режущими кромками сменных многогранных пластин (СМП). Построение эффективных методов расчета оценочных параметров невозможно без математического описания режущих кромок СМП, её передней и задней поверхностей. В работах [1-5] данная задача решается путем дискретного представления режущих кромок СМП массивом точек с рассчитанными в каждой точке параметрами: координатами точки в соб-

ственной системе координат, длиной дуги профиля режущей кромок, векторами нормали к передней и задней поверхностям. Для реализации последующих проектных процедур предполагается выполнение перехода от дискретного представления к аналитическому путем применения метода кубической сплайн-интерполяции. Однако реализация подобного подхода на практике требует значительных вычислительных ресурсов, что в первую очередь сказывается на времени выполнения расчетов.

Одним из возможных решений данной проблемы является аналитическое описание режущих кромок СМП набором векторных функций:

$$\bar{r}_k(s_k), \bar{N}_k(s_k), \bar{T}_k(s_k),$$

где  $\bar{r}_k(s_k)$  - функция радиуса-вектора режущей кромок  $k$ -й СМП;  $s_k$  - параметр длины режущей кромок,  $s_k = 0..s_{k\max}$ ;

$\bar{N}_k(s_k)$  - функция вектора нормали к пе-

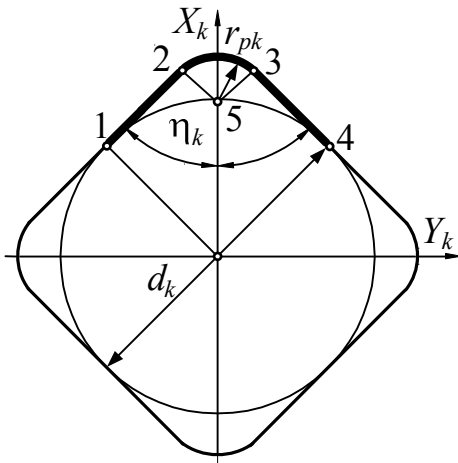


Рис. 1. Схема расчета опорных точек профиля равносторонних и равноугольных пластин с радиусом при вершине

редней поверхности  $k$ -й СМП;  $\bar{T}_k(s_k)$  - функция вектора нормали к задней поверхности  $k$ -й СМП.

Рассмотрим методы расчета этих функций для некоторых форм и исполнений пластин (по ГОСТ 19042-80), применяемых в конструкциях сборных фасонных фрез.

1. Равносторонние и равноугольные пластины с радиусом при вершине. Исходные данные для выполнения расчета (рис. 1):  $N_k$  - количество типовых участков режущей кромки (число сторон пластины);  $d_k$  - диаметр вписанной окружности;  $r_{pk}$  - радиус при вершине;  $S_{pk}$  - толщина пластины;  $\alpha_k, \gamma_k$  - задний и передний углы пластины.

На основе этих параметров выполним расчет опорных точек участка профиля (точки 1-5):

$$x_1 = \frac{d_k}{2} \sin(\eta_k); \quad y_1 = -\frac{d_k}{2} \cos(\eta_k),$$

где  $\eta_k$  - половина угла при вершине,

$$\eta_k = \pi(N_k - 2)/2N_k;$$

$$x_2 = \frac{d_k/2 - r_{pk} \cos^2(\eta_k)}{\sin(\eta_k)}; \quad y_2 = -r_{pk} \cos(\eta_k);$$

$$x_3 = x_2; \quad y_3 = -y_2;$$

$$x_5 = (d_k/2 - r_{pk}) \sin^{-1}(\eta_k); \quad y_5 = 0.$$

Функции координат радиуса-вектора типового участка профиля (точки 1-4) режущей кромки  $k$ -й СМП

$$\bar{r}_{ki}(s_{ki}) = [x_{ki}(s_{ki}), y_{ki}(s_{ki}), z_{ki}(s_{ki}), 1]^T \quad (1)$$

представим как

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ s_{ki}(y_2 - y_1)/s_2 + y_1, & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ -r_{pk} \sin(\pi/2 - \eta_k - (s_{ki} - s_2)/r_{pk}), & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ (s_{ki} - s_3)(y_4 - y_3)/(s_4 - s_3) + y_3, & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ y_4, & s_{ki} > s_4; \end{cases}$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ x_1 + (x_2 - x_1)(y_{ki}(s_{ki}) - y_1)/(y_2 - y_1), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ x_5 + r_{pk} \cos(\pi/2 - \eta_k - (s_{ki} - s_2)/r_{pk}), & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ x_3 + (x_4 - x_3)(y_{ki}(s_{ki}) - y_3)/(y_4 - y_3), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ x_4, & s_{ki} > s_4; \end{cases}$$

$$z_{ki}(s_k) = -S_{pk},$$

где  $s_2, s_3, s_4$  - длина профиля режущей кромки соответственно в точках 2, 3 и 4.

$$s_2 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad s_3 = s_2 + (\pi - 2\eta_k)r_{pk}, \quad s_4 = s_2 + s_3.$$

Тогда с учетом (1) функцию радиуса-вектора всей режущей кромки  $k$ -й СМП запишем как

$$\bar{r}_k(s_k) = A^6 \left( \frac{2\pi}{N_k} \left[ \frac{s_k}{s_{ki \max}} \right] \right) \cdot \bar{r}_{ki} \left( s_k - \left[ \frac{s_k}{s_{ki \max}} \right] \cdot s_{ki \max} \right), \quad (2)$$

где  $s_{ki\max} = s_4$ .

Вектор нормали к передней поверхности типового участка профиля (точки 1-4) режущей кромки  $k$ -й СМП рассчитаем как

$$\bar{N}_{ki}(s_{ki}) = \left( -\bar{j}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\sin(\gamma_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, \bar{i}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\sin(\gamma_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, -\cos(\gamma_k), 0 \right)^T,$$

а вектор нормали всей режущей кромки  $k$ -й СМП - как

$$\bar{N}_k(s_k) = A^6 \left( \frac{2\pi}{N_k} \left[ \frac{s_k}{s_{ki\max}} \right] \right) \cdot \bar{N}_{ki} \left( s_k - \left[ \frac{s_k}{s_{ki\max}} \right] \cdot s_{ki\max} \right). \quad (3)$$

Вектор нормали к задней поверхности типового участка профиля (точки 1-4) режущей кромки  $k$ -й СМП рассчитаем как

$$\bar{T}_{ki}(s_{ki}) = \left( \bar{j}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\cos(\alpha_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, -\bar{i}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\cos(\alpha_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, \sin(\alpha_k), 0 \right)^T,$$

а вектор нормали всей режущей кромки  $k$ -й СМП - как

$$\bar{T}_k(s_k) = A^6 \left( \frac{2\pi}{N_k} \left[ \frac{s_k}{s_{ki\max}} \right] \right) \cdot \bar{T}_{ki} \left( s_k - \left[ \frac{s_k}{s_{ki\max}} \right] \cdot s_{ki\max} \right). \quad (4)$$

2. Для круглой СМП координаты опорных точек участка профиля (рис. 2) рассчитаем как

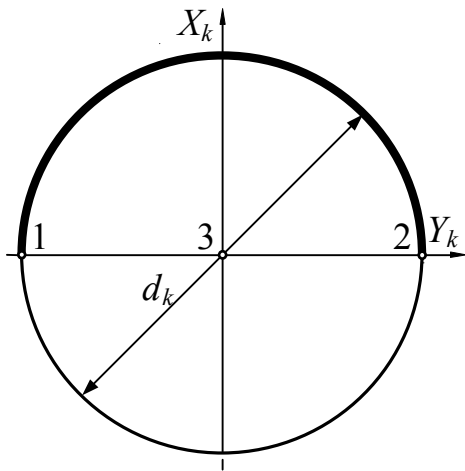


Рис. 2. Схема расчета опорных точек профиля круглой СМП

$$x_1 = 0; y_1 = -d_k/2;$$

$$x_2 = 0; y_2 = d_k/2;$$

$$x_3 = 0; y_3 = 0.$$

Функции координат радиуса-вектора типового участка профиля (точки 1 и 2) режущей кромки  $k$ -й СМП запишем как

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ -d_k/2 \cos(2s_{ki}/d_k), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ y_2, & s_{ki} > s_2; \end{cases}$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ -d_k/2 \sin(2s_{ki}/d_k), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ x_2, & s_{ki} > s_2; \end{cases}$$

где  $s_2 = d_k \pi/2$ .

Тогда функции радиуса-вектора всей режущей кромки СМП, векторов нормали к передней и задней поверхностям рассчитаем по формулам (2), (3) и (4), принимая  $N_k = 2$  и  $s_{ki\max} = s_2$ .

3. Для ромбической пластины (рис. 3) координаты опорных точек профиля (точки 1-9) рассчитаем как

$$x_1 = 0; y_1 = -\frac{r_{pk}(\cos(\eta_k) - 1) + d_k/2}{\cos(\eta_k)};$$

$$x_2 = r_{pk} \sin(\eta_k);$$

$$y_1 = -\frac{r_{pk}(\cos^2(\eta_k) - 1) + d_k/2}{\cos(\eta_k)};$$

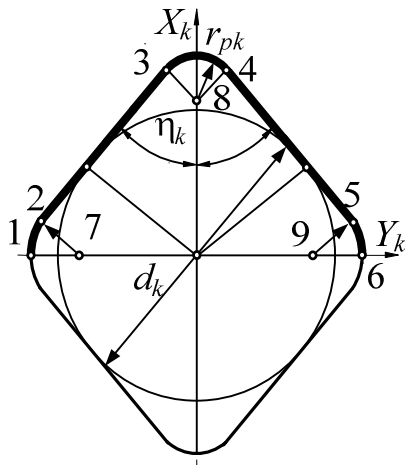


Рис. 3. Схема расчета опорных точек профиля ромбической СМП

$$x_3 = -\frac{r_{pk} \cos^2(\eta_k) - d_k/2}{\sin(\eta_k)};$$

$$\begin{aligned} y_3 &= -r_{pk} \cos(\eta_k); \\ x_4 &= x_3; y_4 = -y_3; \\ x_5 &= x_2; y_5 = -y_2; \\ x_6 &= x_1; y_6 = -y_1; x_7 = 0; \\ y_7 &= -\frac{d_k/2 - r_{pk}}{\cos(\eta_k)}; \\ x_8 &= -\frac{d_k/2 - r_{pk}}{\sin(\eta_k)}; y_8 = 0; \\ x_9 &= x_7; y_9 = -y_7. \end{aligned}$$

Функции координат радиуса-вектора типового участка профиля (точки 1-6) режущей кромки  $k$ -й СМП запишем как

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ y_7 - r_{pk} \cos(s_{ki}/r_{pk}), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ (s_{ki} - s_2)(y_3 - y_2)/(s_3 - s_2) + y_2, & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ -r_{pk} \cos(\eta_k + (s_{ki} - s_3)/r_{pk}), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ (s_{ki} - s_4)(y_5 - y_4)/(s_5 - s_4) + y_4, & s_4 < s_{ki} \leq s_5; \\ y_9 + r_{pk} \cos((s_{ki} - s_5)/r_{pk} + \eta_k), & s_5 < s_{ki} \leq s_6; \\ y_6, & s_{ki} > s_6; \end{cases}$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ r_{pk} \sin(s_{ki}/r_{pk}), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ (x_3 - x_2)(y_{ki}(s_{ki}) - y_2)/(y_3 - y_2) + x_2, & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ x_8 + r_{pk} \sin(\eta_k + (s_{ki} - s_3)/r_{pk}), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ (x_5 - x_4)(y_{ki}(s_{ki}) - y_4)/(y_5 - y_4) + x_4, & s_4 < s_{ki} \leq s_5; \\ -r_{pk} \sin((s_{ki} - s_5)/r_{pk} - \eta_k), & s_5 < s_{ki} \leq s_6; \\ x_6, & s_{ki} > s_6; \end{cases}$$

где  $s_2 = \eta_k r_{pk}$ ,  $s_3 = s_2 + \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}$ ,  $s_4 = s_3 + (\pi - 2\eta_k)r_{pk}$ ,  $s_5 = s_3 + s_4 - s_2$ ,  $s_6 = s_5 + s_2$ .

Функции радиуса-вектора всей режущей кромки СМП, векторов нормали к передней и задней поверхностям рассчитаем по формулам (2), (3) и (4), принимая  $N_k = 2$  и  $s_{ki \max} = s_6$ .

$$x_1 = \frac{d_k}{2} \sin(\eta_k); y_1 = -\frac{d_k}{2} \cos(\eta_k);$$

4. Для треугольной пластины с фасками при вершине без отверстия (по ГОСТ 27302-87) координаты опорных точек профиля (точки 1-5) рассчитаем как (рис. 4)



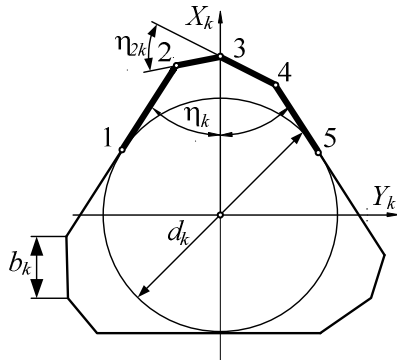


Рис. 4. Схема расчета опорных точек профиля треугольной СМП с фасками при вершине

$$x_2 = b_k \left[ \frac{(2 \cos^2(\eta_k) - 1)}{\cos(\eta_{2k})} \sin(\eta_k - \eta_{2k}) + \frac{1 - 2 \cos^2(\eta_k)}{\sin(\eta_k)} \right] + \frac{d_k}{2 \sin(\eta_k)}$$

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ s_{ki}(y_2 - y_1)/s_2 + y_1, & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ (s_{ki} - s_2)(y_3 - y_2)/(s_3 - s_2) + y_2, & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ (s_{ki} - s_3)(y_4 - y_3)/(s_4 - s_3) + y_3, & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ (s_{ki} - s_4)(y_5 - y_4)/(s_5 - s_4) + y_4, & s_4 < s_{ki} \leq s_5; \\ y_5, & s_{ki} > s_5; \end{cases}$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ x_1 + (x_2 - x_1)(y_{ki}(s_{ki}) - y_1)/(y_2 - y_1), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ x_2 + (x_3 - x_2)(y_{ki}(s_{ki}) - y_2)/(y_3 - y_2), & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ x_3 + (x_4 - x_3)(y_{ki}(s_{ki}) - y_3)/(y_4 - y_3), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ x_4 + (x_5 - x_4)(y_{ki}(s_{ki}) - y_4)/(y_5 - y_4), & s_4 < s_{ki} \leq s_5; \\ x_5, & s_{ki} > s_5; \end{cases}$$

где  $s_2 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ ,  $s_3 = s_2 + \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}$ ,  $s_4 = s_3 + \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}$ ,  $s_5 = s_4 + \sqrt{(x_5 - x_4)^2 + (y_5 - y_4)^2}$ .

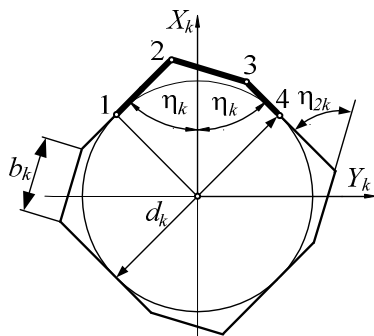


Рис. 5. Схема расчета опорных точек профиля квадратной СМП с фасками при вершине

$$y_2 = b_k \frac{(2 \cos^2(\eta_k) - 1)}{\cos(\eta_{2k})} \cos(\eta_k - \eta_{2k});$$

$$x_3 = \frac{d_k - 2b_k(2 \cos^2(\eta_k) - 1)}{2 \sin(\eta_k)}; y_3 = 0;$$

$$x_4 = \frac{d_k - 2b_k \cos^2(\eta_k)}{2 \sin(\eta_k)}; y_4 = b_k \cos(\eta_k).$$

Функции координат радиуса-вектора типового участка профиля (точки 1-5) режущей кромки  $k$ -й СМП запишем как

Функции радиуса-вектора всей режущей кромки СМП, векторов нормали к передней и задней поверхностям рассчитаем по формулам (2), (3) и (4), принимая  $N_k = 3$  и  $s_{ki \max} = s_5$ .

5. Для квадратной пластины с фасками при вершине без отверстия (по ГОСТ 27302-87) координаты опорных точек профиля (точки 1-4) рассчитаем как (рис. 5)

$$x_1 = \frac{d_k}{2} \sin(\eta_k); y_1 = -\frac{d_k}{2} \cos(\eta_k);$$

$$x_2 = a \cdot \cos(\eta_k - \arccos(d_k/2a));$$

$$y_2 = -a \cdot \sin(\eta_k - \arccos(d_k/2a)),$$

где  $a = \sqrt{(d_k/2)^2 + (d_k/2 - b_k \cos(\eta_{2k}))^2}$ ;

$$x_3 = b \cdot \cos(\eta_k - \arccos(d_k/2b));$$

$$y_3 = b \cdot \sin(\eta_k - \arccos(d_k/2b)),$$

где  $b = \sqrt{(d_k/2)^2 + (d_k/2 - b_k \sin(\eta_{2k}))^2}$ ;

$$x_4 = x_1; \quad y_4 = -y_1.$$

Функции координат радиуса-вектора типового участка профиля (точки 1-4) режущей кромки  $k$ -й СМП запишем как

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ s_{ki}(y_2 - y_1)/s_2 + y_1, & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ (s_{ki} - s_2)(y_3 - y_2)/(s_3 - s_2) + y_2, & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ (s_{ki} - s_3)(y_4 - y_3)/(s_4 - s_3) + y_3, & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ y_4, & s_{ki} > s_4; \end{cases}$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ x_1 + (x_2 - x_1)(y_{ki}(s_{ki}) - y_1)/(y_2 - y_1), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ x_2 + (x_3 - x_2)(y_{ki}(s_{ki}) - y_2)/(y_3 - y_2), & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ x_3 + (x_4 - x_3)(y_{ki}(s_{ki}) - y_3)/(y_4 - y_3), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ x_4, & s_{ki} > s_4; \end{cases}$$

где  $s_2 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ ,

$$s_3 = s_2 + \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2},$$

$$s_4 = s_3 + \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}.$$

Реализация данных функций в системе Maple позволила выполнить моделирование и геометрическое представление ре-

жущих кромок рассматриваемых СМП (рис. 6).

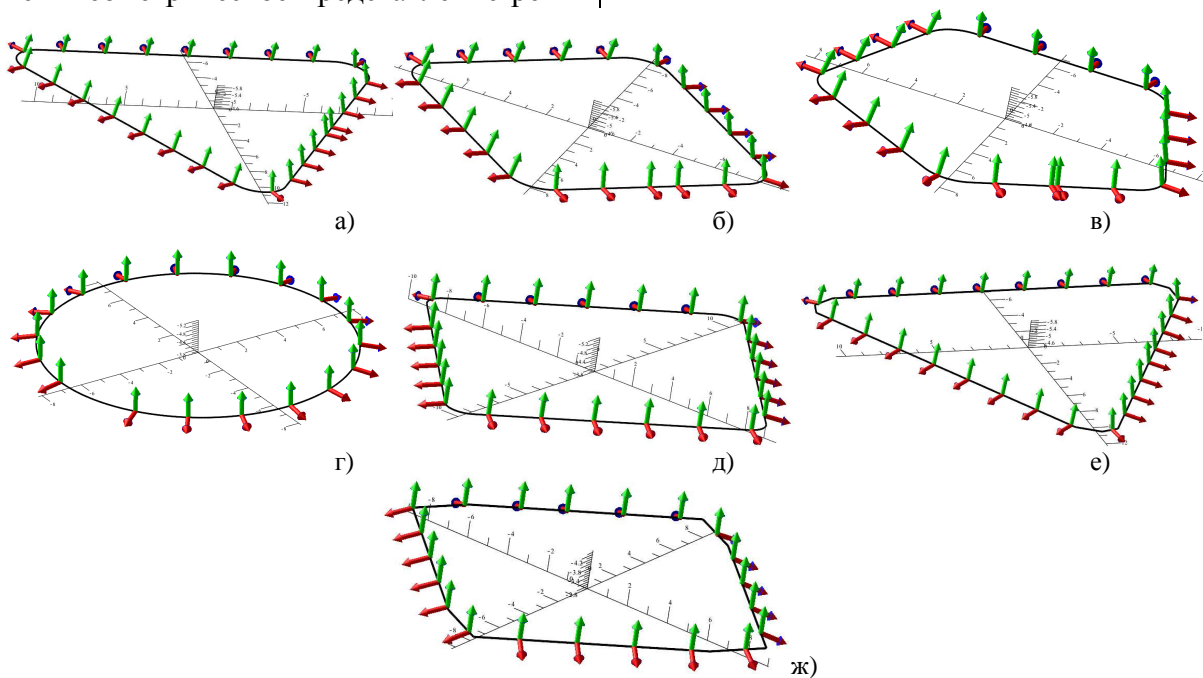


Рис. 6. Геометрическое представление результатов математического моделирования режущих кромок СМП: а - треугольной с радиусом при вершине; б - квадратной с радиусом при вершине; в - пятигранной с радиусом при вершине; г - круглой; д - ромбической; е - треугольной с фасками при вершине; ж - квадратной с фасками при вершине

На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод о правильности построенных функций, что позволя-

ет использовать их для создания CAD/CAM-систем сборных фасонных фрез.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ №16-38-00166.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лашнев, С.И. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: монография / С.И. Лашнев, А.Н. Борисов, С.Г. Емельянов. - Курск: КГТУ, 1997. - 391 с.
2. Куц, В.В. Повышение эффективности расчета сборных дисковых фрез для обработки шеек коленчатых валов на основе компьютерно-ориентированного моделирования: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Куц. - М., 2000.
3. Емельянов, С.Г. Корректировка положения сменных многогранных пластин при проектировании сборных дисковых фрез / С.Г. Емельянов, В.В. Куц // СТИН. - 2000. - № 2. - С. 11-12.
4. Емельянов, С.Г. Моделирование процесса обработки шейки коленчатого вала сборной дисковой фрезой, оснащенной сменными многогранными пластинами / С.Г. Емельянов, В.В. Куц // Техника машиностроения. - 1999. - № 2. - С. 28-31.
5. Куц, В.В. Расчет величин искажения профиля обрабатываемой фасонной поверхности при разработке CAD/CAM-системы сборных фасонных фрез / В.В. Куц // Автоматизация. Современные технологии. - 2004. - № 11. - С. 5-8.
1. Lashnev, S.I. *Geometrical Theory of Surface Formation by Cutters*: monograph / S.I. Lashnev, A.N. Borisov, S.G. Yemeliyanov. - Kursk: KSTU, 1997. - pp. 391.
2. Kuts, V.V. Efficiency increase of compound disk cutter computation for crankshaft journals machining based on computer-directed modeling: *Thesis for Can. Eng. degree* / V.V. Kuts. - M., 2000.
3. Yemeliyanov, S.G. *Replaceable Indexable Inserts at Designing Compound Disk Cutters* / S.G. Yemeliyanov, V.V. Kuts // STIN. - 2000. - № 2. - pp. 11-12.
4. Yemeliyanov, S.G. Simulation of crankshaft journal machining with compound disk cutter equipped with replaceable indexable inserts / S.G. Yemeliyanov, V.V. Kuts // *Techniques of Mechanical Engineering*. - 1999. - № 2. - pp. 28-31.
5. Kuts, V.V. Computation of profile distortion values of formed surface machined at development of CAD/CAM system of compound form cutters / V.V. Kuts // *Automation. Current Techniques*. - 2004. - № 11. - pp. 5-8.

Статья поступила в редколлегию 2.03.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Юго-Западного государственного университета  
Ивахненко А.Г.

### Сведения об авторах:

**Ходыревская Светлана Васильевна**, к.т.н., доцент Юго-Западного государственного университета, e-mail: [svetlana.hod@mail.ru](mailto:svetlana.hod@mail.ru).

**Горохов Александр Анатольевич**, к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета, e-mail: [nauka46@regionika.ru](mailto:nauka46@regionika.ru).

**Khodyrevskaya Svetlana Vasilievna**, Can. Eng., Assistant Prof., South-Western State University, e-mail: [svetlana.hod@mail.ru](mailto:svetlana.hod@mail.ru).

**Gorokhov Alexander Anatolievich**, Can. Eng., Assistant Prof., Bryansk State Technical University, e-mail: [nauka46@regionika.ru](mailto:nauka46@regionika.ru).

**Мальнева Юлия Андреевна**, к.т.н., доцент Юго-Западного государственного университета, e-mail: [maximenckoyuliya2010@yandex.ru](mailto:maximenckoyuliya2010@yandex.ru).

**Куц Ольга Геннадьевна**, аспирант Юго-Западного государственного университета, e-mail: [kuts.ekocentr@mail.ru](mailto:kuts.ekocentr@mail.ru).

**Malneva Julia Andreevna**, Can. Eng., Assistant Prof., South-Western State University, e-mail: [maximenckoyuliya2010@yandex.ru](mailto:maximenckoyuliya2010@yandex.ru).

**Kuts Olga Gennadievna**, Post graduate student, South-Western State University, e-mail: [kuts.ekocentr@mail.ru](mailto:kuts.ekocentr@mail.ru).

УДК 621.9.047

DOI: 10.12737/article\_59b11cb6918cc4.39698022

С.Ю. Сьянов

## РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Описаны этапы разработки функционально-ориентированных технологических процессов электроэрозионной обработки от выделения поверхностей деталей и их служебных функций до определения параметров процесса электрической эрозии, которые обеспечат не только параметры

качества поверхностного слоя, но и требуемые эксплуатационные свойства.

**Ключевые слова:** функционально-ориентированный технологический процесс, электроэрозионная обработка, качество поверхностного слоя, эксплуатационные свойства деталей машин.

S.Yu. Syanov

## DEVELOPMENT OF FUNCTIONALLY-ORIENTED TECHNOLOGICAL PROCESS OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Describes the development of functionally-oriented technological process of electrical discharge machining. Functionally-oriented technological processes belong to a special thin, accurate and science-intensive technologies, which provide complete adaptation of the product to the features of its operation. Describes the stages of development of functionally-oriented technological process of electrical discharge machining from the allocation of

the surfaces of the parts and their functions to determine the process parameters of electric erosion, which will ensure not only the quality parameters of the surface layer, but also the required performance properties.

**Key words:** functionally-oriented technological process, electrical discharge machining, the quality of the surface layer, the operational properties of machine parts.

### Введение

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) - один из прогрессивных и экономически выгодных методов обработки материалов в машиностроении. Процесс формирования поверхностей деталей при ЭЭО осуществляется наиболее прогрессивным методом по сравнению с процессами механической обработки материалов резанием. ЭЭО позволяет проводить обработку как электропроводящих, так и неэлектропроводящих материалов независимо от их физико-механических свойств, формы и расположения поверхностей обрабатываемых деталей, что выгодно отличает ее от механической обработки резанием, в особенности при обработке труднообрабатываемых материалов.

Несмотря на положительные технические, технологические и экономические показатели, ЭЭО имеет свои области применения и недостатки из-за своей физической природы. Основным недостаток ЭЭО -

высокая энергоемкость по сравнению с обработкой резанием при изготовлении деталей простой формы из конструкционных материалов при одинаковых условиях обработки (производительности и качестве поверхностного слоя).

ЭЭО экономически выгодно применять при обработке изделий сложной пространственной формы и из труднообрабатываемых материалов, а также в тех случаях, когда поверхности достаточно сложно изготовить другими методами обработки.

Таким образом, ЭЭО имеет ряд существенных преимуществ, которые расширяют область практического применения данного метода обработки при производстве различных изделий машиностроения.

Процессы, протекающие при ЭЭО, подробно изучены, выявлено влияние технологических режимов обработки на качество поверхностного слоя, точность, износ

электрода-инструмента и производительность процесса [1 - 5].

Однако разрушения механизмов и машин (износные, усталостные, коррозионные и др.) начинаются с рабочих поверхностей деталей, поэтому разработка мероприятий по повышению их надежности на основе обеспечения заданных, требуемых или предельных эксплуатационных свойств является актуальной проблемой. Данная проблема обычно решается на этапе конструкторской и технологической подготовки производства изделий. Особенно важным этапом подготовки производства изделий является разработка и реализация технологического процесса их изготовления. Именно на этом этапе формируются свойства изделий, необходимые для выполнения требуемых эксплуатационных функций.

Также можно отметить, что применяемые в настоящее время технологии электроэрозионной обработки изделий обеспечивают необходимые эксплуатационные показатели только для ограниченных условий работы. Решение данного вопроса возможно на основе применения для изготовления изделий электроэрозионными методами функционально-ориентированных технологий [6; 7].

**Разработка функционально-ориентированного технологического процесса электроэрозионной обработки.** Задача, которая решается при разработке функционально-ориентированного технологического процесса ЭЭО, - определение оптимальных условий ведения ЭЭО, обеспечивающих выполнение требуемых эксплуатационных функций и повышение надежности изделия в целом (рис. 1).

Основные этапы разработки функционально-ориентированных технологических процессов ЭЭО следующие:

- 1) анализ основных элементов конструкции и выделение типовых поверхностей изделия;
- 2) определение служебных функций типовых поверхностей изделия;
- 3) определение эксплуатационного свойства или группы эксплуатационных свойств, обеспечивающих выполнение поверхностью изделия служебной функции;

4) определение параметров качества поверхностного слоя, обеспечивающих эксплуатационное свойство или группу эксплуатационных свойств;

5) рассмотрение схемы технологического воздействия, вариантов и условий реализации технологических операций ЭЭО для обеспечения необходимых параметров качества поверхностного слоя.

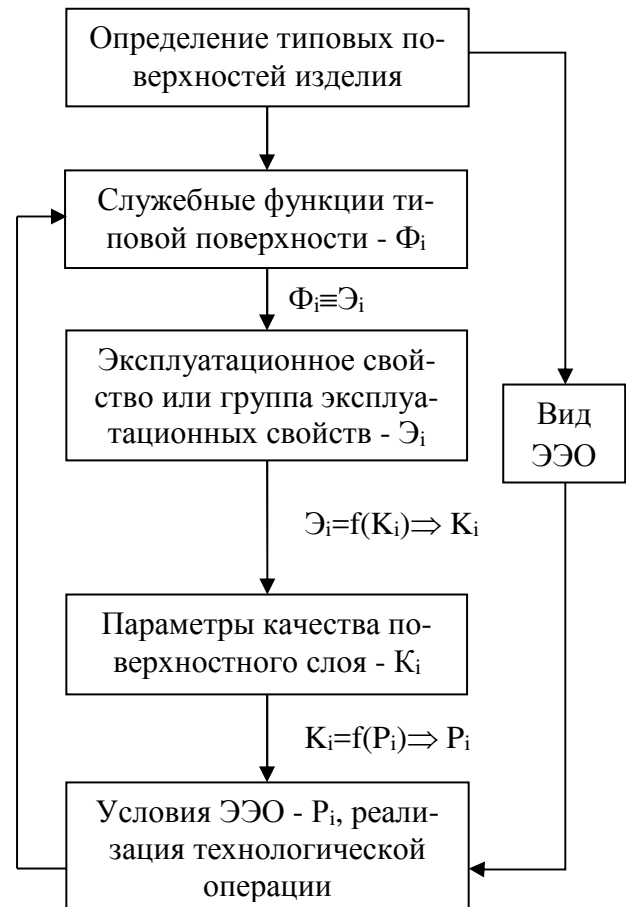


Рис. 1. Этапы разработки функционально-ориентированного технологического процесса электроэрозионной обработки

Классификацию типовых поверхностей деталей осуществляют с учетом общих требований к разработке технологического процесса. Технологический процесс обработки заготовки определяется формой (конфигурацией), точностью обработки и качеством обработанной поверхности, материалом детали, размерами, годовой программой выпуска и общей производственной обстановкой. Соответственно технологический процесс обработки типовых поверхностей детали также должен учитывать перечисленные выше условия (требования, данные и т.п.). Одна-

ко применительно к типовой поверхности перечень определяющих факторов может быть сужен. Наиболее существенные показатели для типовой поверхности с точки зрения выбора маршрута обработки - форма (вид) поверхности, точность и качество поверхности, вид материала заготовки.

Размеры детали существенно влияют на характер оборудования и в меньшей мере - на маршрут обработки.

Поэтому все имеющиеся на деталях поверхности можно разделить на следующие типовые виды:

- 1) наружные цилиндрические - гладкие и ступенчатые;
- 2) наружные конические;
- 3) внутренние цилиндрические (отверстия) - гладкие и ступенчатые, сквозные и глухие;
- 4) внутренние конические;
- 5) плоские (в том числе торцовые и прерывистые);
- 6) фасонные;
- 7) резьбовые;
- 8) шлицевые;
- 9) зубья (различного профиля).

Вид типовой поверхности оказывает основное влияние на применяемые методы ЭЭО, которые делятся на следующие разновидности:

- 1) электроэрозионная отрезка;
- 2) электроэрозионное объемное копирование;
- 3) электроэрозионное вырезание;
- 4) электроэрозионное прошивание;
- 5) электроэрозионное шлифование;
- 6) электроэрозионная доводка;
- 7) электроэрозионное упрочнение;
- 8) электроэрозионное легирование.

Разбив изделие на типовые поверхности, необходимо определить их служебные функции.

Служебные функции поверхностей детали используются технологами при проектировании технологического процесса механической обработки.

Любое изделие предназначено выполнять соответствующее служебное

назначение посредством своих поверхностей. Следовательно, каждая поверхность изделия предназначена выполнять определенную служебную функцию. Классификация поверхностей изделия по признаку служебного функционирования представлена на рис. 2.

Свободная поверхность (СП) – не сопрягаемая с поверхностями других деталей. Все свободные поверхности являются связующими, то есть служат для объединения всех исполнительных поверхностей в единое пространство «тело – деталь» и придания детали нужных форм, размеров, технологичности, прочности, эстетичности.

Исполнительные поверхности (ИП) – поверхности, при помощи которых машина или отдельные ее механизмы выполняют свое служебное назначение. Исполнительные поверхности подразделяются на технологические и конструкторские поверхности.

Технологические поверхности, или поверхности технологического назначения (ПТН), предназначены для технологических целей и не влияют существенно ни на служебное назначение, ни на форму детали. К ним относятся:

- разделяющие ПТН (например: технологические канавки); технологическая цель (функция) – разделение поверхностей с разной точностью во время обработки;

- базирующие ПТН (например: центровые отверстия, технологические выточки и отверстия, технологические плоскости); технологическая цель (функция) – базирование при обработке, то есть контакт с базовыми поверхностями приспособлений.

Конструкторские поверхности (КП) – поверхности, при помощи которых машина или отдельные ее механизмы выполняют свое служебное назначение; контактируют с поверхностями других деталей или с рабочей средой. Конструкторские поверхности делятся на рабочие и базирующие.

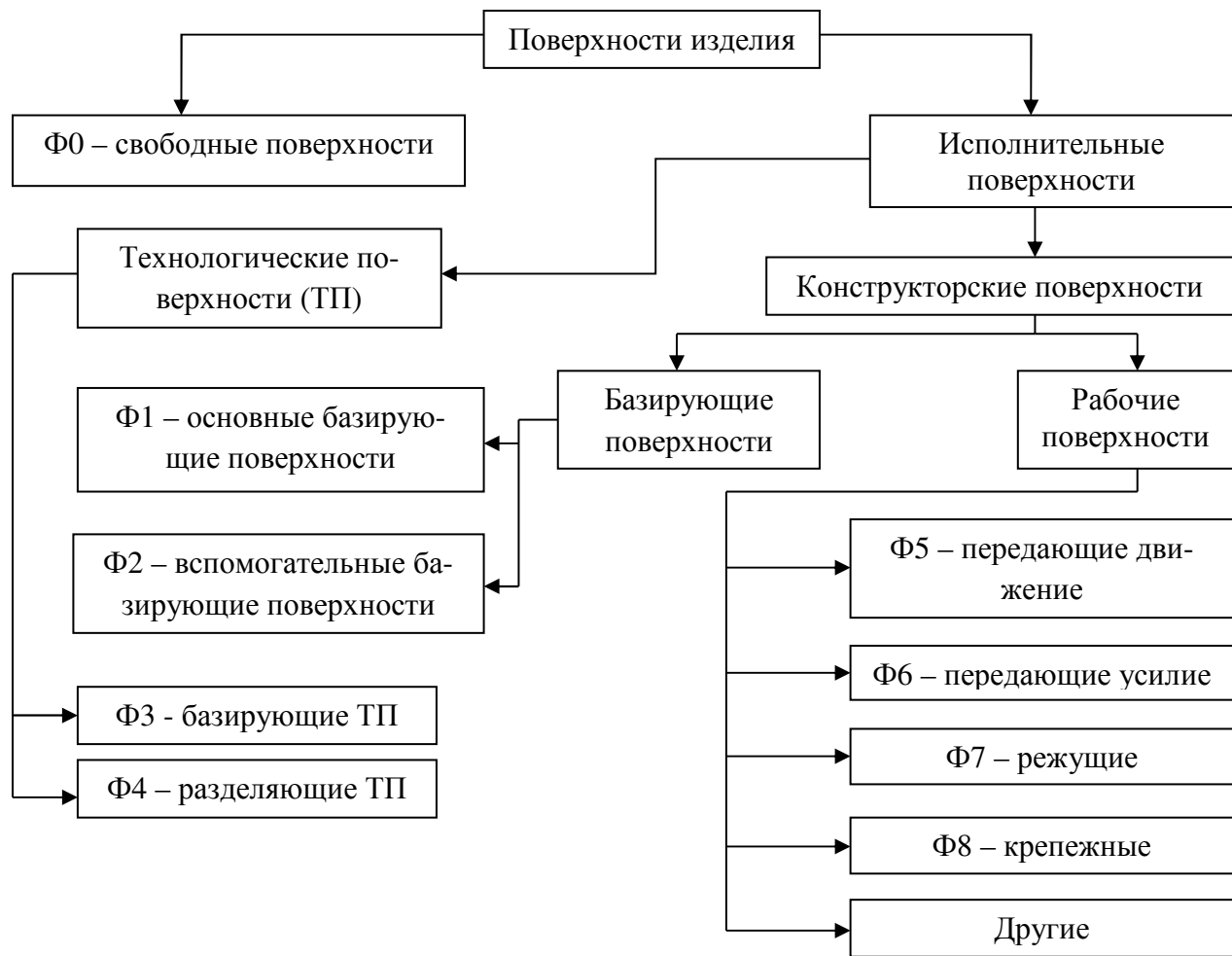


Рис. 2. Классификация функций поверхностей изделия

Рабочие поверхности (РП) участвуют в осуществлении того или иного рабочего процесса машины.

Поверхности или заменяющие их сочетания поверхностей, относительно которых определяется положение других поверхностей детали, принято называть базирующими поверхностями или базами. Для баз характерно определенное взаимное расположение, которое образует комплект баз.

После определения служебных функций  $\Phi_i$  поверхностей изделий необходимо определить эксплуатационные свойства  $\mathcal{E}_i$  (износостойкость, усталостная прочность, контактная жесткость, коррозионная стойкость и др.), которые будут обеспечивать выполнение требуемой эксплуатационной функции.

Зная эксплуатационные свойства  $\mathcal{E}_i$  и функциональные взаимосвязи данных экс-

плуатационных свойств с технологическими параметрами, а именно с качеством поверхностного слоя ( $\mathcal{E}_i=f(K_i)$ ) [8], можно определить оптимальные параметры качества поверхностного слоя  $K_i$ , необходимые для обеспечения требуемой эксплуатационной функции поверхности  $\Phi_i$ .

Используя полученные параметры качества поверхностного слоя  $K_i$ , физику процесса ЭЭО и функциональную взаимосвязь параметров качества поверхностного слоя с условиями ведения ЭЭО ( $K_i=f(P_i)$ ) [1 - 5], определяют необходимые технологические воздействия  $P_i$  (материал электрода-инструмента, свойства диэлектрической жидкости, технологический ток, технологическое напряжение, длительность и скважность импульса и др.) для обеспечения требуемой эксплуатационной функции поверхности изделия  $\Phi_i$ .

## Заключение

В статье изложен общий подход к разработке функционально-ориентированных технологических процессов ЭЭО на основе целого комплекса новых принципов проектирования технологических процессов. Для реализации функционально-ориентированных технологий ЭЭО приведена общая методология и методика их выполнения. Функционально-ориентированные технологии ЭЭО су-

щественно повышают технико-экономические показатели эксплуатации изделий и обеспечивают реализацию их полного потенциала возможностей. Также создаются возможности для обеспечения равной долговечности и качества эксплуатации всех элементов изделия. При этом существенно снижаются трудовые затраты на изготовление изделий и их себестоимость.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сьянов, С.Ю. Связь параметров электрофизической обработки с показателями качества поверхности, износа инструмента и производительностью процесса / С.Ю. Сьянов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008. - № 1 (17). - С. 14-19.
2. Федонин, О.Н. Методика определения технологических остаточных напряжений при механической и электрофизической обработке / О.Н. Федонин, С.Ю. Сьянов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2002. - № 4. - С. 32.
3. Федонин, О.Н. Управление износом инструмента и производительностью процесса при электроэрозионной обработке / О.Н. Федонин, С.Ю. Сьянов, Н.И. Фомченкова // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2014. - № 3. - С. 85-88.
4. Сьянов, С.Ю. Технологическое управление параметрами качества поверхностного слоя деталей машин при электроэрозионной обработке / С.Ю. Сьянов // Научно-технические проблемы машиностроения. - 2014. - № 6 (36). - С. 24-29.
5. Сьянов, С.Ю. Теоретическое определение параметров качества поверхностного слоя деталей, износа электрода-инструмента и производительности процесса при электроэрозионной обработке / С.Ю. Сьянов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2016. - № 1 (49). - С. 67-73.
6. Михайлов, А.Н. Общие особенности функционально-ориентированных технологий и принципы ориентации их технологических воздействий и свойств изделий / А.Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XIV междунар. науч.-техн. конф. (г. Севастополь, 17-22 сент. 2007 г.): в 5 т. - Донецк: ДонНТУ, 2007. - Т. 3. - С. 38 - 52.
7. Михайлов, А.Н. Функционально-ориентированные технологии. Особенности синтеза новых и нетрадиционных свойств изделий / А.Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XV междунар. науч.-техн. конф. (г. Севастополь, 15-20 сент. 2008 г.): в 4 т. - Донецк: ДонНТУ, 2008. - Т. 2.- С. 290 - 314.
8. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. - М.: Машиностроение, 2002. - 684 с.
1. Syanov, S.Yu. Connection of electro-physical working parameters with surface quality, tool wear and process productivity / S.Yu. Syanov // Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2008. - No 1(17). - pp. 14-19.
2. Fedonin, O.N. Methods for technological residual stress definition at machining and electro-physical working / O.N. Fedonin, S.Yu. Syanov // Metal Working (Technology, Equipment, Toolware). - 2002. - No 4. - pp. 32.
3. Fedonin, O.N. Tool wear and productivity control at electro-erosion machining / O.N. Fedonin, S.Yu. Syanov, N.I. Fomchenkova // Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2014. - No 3. - pp. 85-88.
4. Syanov, S.Yu., Technological control of quality parameters in surface layer of machinery at electro-erosion machinery / S.Yu. Syanov // High Technologies in Mechanical Engineering. - 2014. - No 6. - pp. 24-29.
5. Syanov, S.Yu. Theoretical definition for quality parameters of surface layer in parts, tool-electrode wear and process productivity at electroerosion machining / S.Yu. Syanov // Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2016. - No 1(49). - pp. 67-73.
6. Mikhailov, A. N. Common features of functionally-oriented technologies and principles orientation of their technological effects and properties of products // machine-building and technosphere of the XXI century. Proceedings of the XIV international scientific and technical conference in Sevastopol 17-22 September 2007 In 5 t. T. 3 / A. N.



- Mikhailov. – Donetsk: DonNTU, 2007. - P. 38 – 52.
7. Mikhailov, A. N. Functionally-oriented technologies. Features of the synthesis of new and innovative features of the products // machine-building and technosphere of the XXI century. Proceedings of the XV international scientific and

technical conference in Sevastopol 15-20 September 2008, At 4 T. T. 2 / A. N. Mikhailov. – Donetsk: DonNTU, 2008. - P. 290 – 314.

8. Suslov, A. G. Scientific basic technology of machinestrari / A. G. Suslov, A. M. Dalsky. - M.: Mashinostroenie, 2002. – 684 p.

*Статья поступила в редколлегию 30.01.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Петрешин Д.И.*

#### **Сведения об авторах:**

**Сьянов Сергей Юрьевич**, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные технологические системы» Брянского государственного технического универ-

**Syanov Sergey Yurievich**, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Automated Technological Systems” Bry-

ситета, тел.: (4832) 58-82-85, e-mail: [SERG620@mail.ru](mailto:SERG620@mail.ru).

ansk State Technical University, Phone: (4832) 58-82-85, e-mail: [SERG620@mail.ru](mailto:SERG620@mail.ru).

УДК 621.9.048.6

DOI: 10.12737/article\_59b11cb81c2ec6.01427420

А.П. Шишкина, В.А. Лебедев, М.М. Чаава

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВИБРООБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ КОСТОЧКОВЫМИ ОРГАНИЧЕСКИМИ СРЕДАМИ

На основании анализа подходов к моделированию процессов виброотделки гранулированными средами для описания процесса обработки средами органического происхождения предложен подход, рассматривающий энергетическое воздействие потока гранул на обрабатываемую поверхность без учёта явлений, обусловленных деформационно-упрочняющим эффектом. Разработана модель про-

цесса виброобработки, обеспечивающая эффективную отделку поверхностей деталей средами органического происхождения.

**Ключевые слова:** виброобработка, косточковая органическая среда, удельный металлосъём, давление среды, пороговая амплитуда колебаний, пороговая частота колебаний, высота загрузки, отделка поверхности.

A.P. Shishkina, V.A. Lebedev, M.M. Chaava

## ENERGY ASPECTS OF PARTS VIBRATING PROCESSING WITH KERNEL ORGANIC ENVIRONMENT

This paper reports the fulfilled analysis of approaches to the simulation of the processes of a vibration treatment with granulated media. A model of the vibration treatment process ensuring an efficient finishing of parts surfaces with granules of kernel organic media is developed the basis of which is formed by the approach based on an energetic impact of a granule flow upon the surface under treatment. As a basic characteristic of the process of the organic media treatment a specific volume metal removal is used a physical sense of which consists in the velocity of a thickness growth of material removed from the surface at specified velocity and medium pressure. It is shown that metal removal depends upon the velocity of medium flow, the height of a loading column of granulated medium and conditions of the formation of a medium stationary circulating motion. On the basis of the analysis of experimental investigations results of amplitude-

frequency characteristics influence upon metal removal during the vibrating processing with abrasive granules the dependence of a specific volume metal removal is offered at the treatment with organic media, taking into account a threshold amplitude and oscillation frequency of the working chamber at which the effect of a surface treatment is observed. The defined aggregate of dependences, describing the efficient conditions of vibrating processing with kernel organic media, is obtained with the application of experimental data which allows supposing the reasonableness of the model obtained.

**Key words:** vibrating processing, kernel organic medium, specific metal removal, environment pressure, threshold amplitude of oscillations, threshold frequency of oscillations, loading height, surface finishing.

### Введение

Органические среды представляют собой самостоятельную группу обрабатывающих сред, применение которых в технологии изготовления деталей машин расширяет спектр технологических возможностей вибрационной обработки и повышает её эффективность. Однако недостаточная изученность этих сред, отсутствие методик проектирования отделоч-

ных операций с их использованием ограничивает область их технологического применения. В этой связи разработка модельных представлений условий, обеспечивающих разработку на их основе эффективных технологий отделки поверхностей деталей косточковыми органическими средами, представляет научный и практический интерес.

### Основные подходы к моделированию процессов виброотделки гранулированными средами

Технологический эффект отделочной обработки в условиях вибрационных тех-

нологических систем обусловлен режущим и деформирующим воздействием потоков

частиц рабочей среды на поверхность изделия. Процесс виброабразивной обработки и достигаемый при этом технологический эффект достаточно подробно изучены и представлены в научно-технической литературе [1 - 3].

В числе первых основополагающих работ по раскрытию физической сущности технологических процессов виброабразивной обработки следует выделить работы А.П. Бабичева [1]. Проведённые им исследования механики взаимодействия абра-

зивной среды и детали при вибрационном воздействии позволили ему сформулировать механико-физико-химическую модель процессов разрушения поверхности детали в среде вибрирующих абразивных гранул, которая явилась исходной предпосылкой для дальнейших исследований в этой области. Для определения удельного съема металла в зависимости от различных параметров им предложено обобщенное эмпирическое уравнение в виде

$$q = 3,8 \cdot A^{1,25} \cdot HB^{-0,91} \cdot K_n \cdot K_3 \cdot K_G \cdot K_d \cdot K_V \quad (\text{кг/с}),$$

где  $A$  - амплитуда колебаний, мм;  $HB$  - твёрдость обрабатываемого материала;  $K_n, K_3, K_G, K_d, K_V$  - коэффициенты, отражающие влияние частоты колебаний, зернистости абразивных гранул, массы детали, грануляции обрабатываемой среды, объёма загрузки рабочей камеры соответственно.

Дальнейшее развитие исследования в области виброабразивной обработки получили в работе [2]. На основе теоретических и экспериментальных исследований в ней доказано, что наиболее целесообразным и соответствующим реальному процессу удаления металла представляется метод, заключающийся в определении съема металла при единичном взаимодействии абразивной частицы с поверхностью детали с последующим умножением на количество таких взаимодействий за время обработки. Для определения удельного съема металла с поверхности при виброабразивной обработке предложена зависимость

$$\gamma_{\text{во}} = P_1 \cdot P_2 \cdot \omega \cdot q \cdot \frac{S_{\text{дет}}}{4R^2} \quad (\text{кг/с}),$$

где  $P_1$  - геометрическая вероятность события, заключающегося в том, что любая точка квадрата упаковки покрывается пятном контакта за один цикл воздействия массы абразивных гранул;  $P_2$  - вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведет к микрорезанию;  $\omega$  - частота колебаний рабочей камеры,  $\text{с}^{-1}$ ;  $q$  - съем металла при единичном взаимодействии абразивной гранулы с поверхно-

стью детали, кг;  $S_{\text{дет}}$  - площадь поверхности обрабатываемой детали,  $\text{мм}^2$ ;  $R$  - радиус абразивной гранулы, мм.

В работе [3] предлагается при анализе технологического воздействия движущейся обрабатывающей гранулированной среды рассматривать только эффект удаления металла без учёта явлений, обусловленных деформационно-упрочняющим воздействием абразивных гранул, наблюдаемость которых, по мнению автора, затруднена тем, что процесс деформации поверхности микроударами гранул постепенно стабилизируется за счет сглаживания шероховатости и упрочнения. Эффект удаления металла обусловлен не интенсивностью воздействия абразивных гранул, а объёмным удельным металлосъёмом, который пропорционален плотности потока энергии абразивной среды. Этот подход качественно правильно отражает установленную в многочисленных исследованиях закономерность, что повышение скорости и давления независимо увеличивает удельный металлосъём.

Специфика органических гранулированных сред обусловлена растительным происхождением. Их физико-механические, биолого-химические и режущие свойства формируются в процессе созревания и последующей переработки. В отличие от неорганических сред дробленые косточковые среды обладают невысокой твёрдостью (0,37061...0,58165 ГПа) и малой массой. В результате этого характеристики динамического состояния органической среды, формообразующие и энерге-

тические свойства имеют более низкие показатели по сравнению с виброобработкой деталей природными и синтетическими средами при аналогичных амплитудно-частотных характеристиках процесса. Режущие свойства косточковые органические среды приобретают в результате их дробления. При разрушении корки косточек формируются гранулы размером 4-6 мм, имеющие кромки с разными углами. Наличие угловых кромок у частиц определяет их режущую способность при

взаимодействии с обрабатываемой поверхностью при виброобработке. В этой связи технологическую эффективность процесса обработки органическими гранулированными средами наиболее предпочтительно рассматривать с точки зрения интенсивности энергетического воздействия потока гранул на обрабатываемую поверхность без учёта явлений, обусловленных деформационно-упрочняющим эффектом.

### Моделирование процесса обработки потоками гранул косточковых органических сред

Эксперименты по изучению связи параметров движения абразивной среды в виброконтейнерах с интенсивностью металлосъема, представленные в работе [3], указывают на следующие закономерности. Металлические поверхности, обтекаемые средой с большей скоростью, при прочих равных условиях демонстрируют больший съём металла. При постоянной скорости набегания потока среды съём всегда выше при увеличении давления - собственного со стороны среды (за счет большей ее высоты над образцом) или внешнего, создаваемого нагружающим устройством. В этих экспериментах материал, форма, размер и ориентация образцов в потоке намеренно поддерживались неизменными, чтобы выделить чистый вклад параметров движущейся абразивной среды в динамику металлосъема.

В качестве основной характеристики процесса обработки органическими средами используем удельный объёмный металлосъём  $\gamma_{уд}$  (м/ч), физический смысл которого заключается в скорости нарастания толщины удалённого с поверхности материала при заданных скорости и давлении среды, а в качестве основных факторов процесса - плотность среды  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), добавочное внешнее и внутреннее «гидростатическое» давление в среде  $p$  (Па), среднюю скорость потока среды  $v$  (м/ч).

Считая, согласно принятой концепции описания съема, органическую гранулированную среду сплошной, воспользуемся гидродинамической аналогией.

Одной из характеристик движущейся

сплошной сред является плотность потока энергии, представляющая собой количество энергии, вытекающей в единицу времени из единичного объема, выделенного в среде [4]:

$$E = \rho \cdot v \cdot \left( \frac{v^2}{2} + \varepsilon \right) + p \cdot v,$$

где  $\rho$  - плотность;  $v = |v|^2$  - скорость;  $p$  - давление;  $\varepsilon$  - внутренняя энергия единицы объема среды.

Пренебрегая тепловыми эффектами в гранулированной среде, выражение плотности потока энергии представим в виде

$$E = \left( \frac{\rho \cdot v^2}{2} + p \right) \cdot v. \quad (1)$$

Первый член представляет собой кинетическую энергию, переносимую в единицу времени проходящей через единичную поверхность массой среды, второй - работу, производимую над средой силами давления. Таким образом, выражение (1) характеризует как кинематику, так и энергетику потока среды, а при фиксации режущих свойств гранул и ориентации подвергаемой обработке поверхности также и режущие свойства потока.

При фиксированном направлении потока относительно поверхности выражение для металлосъема можно записать в скалярном виде:

$$\gamma_{уд} = E \cdot \Pi_{\phi},$$

где индекс  $\phi$  указывает на взаимную ориентацию поверхности и потока.

С учетом размерности потока энер-

гии  $E$  (кг/ч<sup>3</sup>) и объемного металлосяема размерность величины  $\Pi_\phi$  - м·ч<sup>2</sup>/кг. Отсюда следует, что величина  $\Sigma$ , обратная  $\Pi_\phi$ , имеет размерность механического напряжения - кг/м·ч<sup>2</sup>. Тогда выражение для металлосяема будет иметь вид

$$\gamma_{уд} = \frac{E}{\Sigma_\phi} = \frac{(\rho \cdot v^2 / 2 + p) \cdot v}{\Sigma_\phi}, \quad (2)$$

т.е. удельный объемный металлосяем пропорционален плотности потока энергии органической гранулированной среды. При этом параметры  $\Sigma$  и  $\Pi$  имеют смысл соответственно модуля сопротивления и параметра податливости разрушению, присущих поверхности данного материала, подвергаемой воздействию потока данной гранулированной среды. Соотношение (2) качественно описывает установленную закономерность, состоящую в том, что повышение скорости и давления независимо увеличивает удельный металлосяем, а при остановке среды съём прекращается.

Для практического использования этого соотношения необходимо, чтобы были известны скорость среды в рабочей камере и параметр  $\Sigma$ .

Исследования, приведённые в работах [3; 5], убедительно показали, что металлосяём зависит от скорости потока среды, высоты столба загрузки гранулированной среды. Условия образования стационарного циркуляционного движения среды по слабо эксцентричным (близким к окружности) эллипсам:

$$\frac{H}{L} \cong 1; \frac{H}{d_\phi} > 6; \frac{(A \cdot \omega)^2}{g \cdot H} < 0,5,$$

где  $H$  - высота загрузки среды;  $L$  - ширина сечения камеры;  $d_\phi$  - средний диаметр частиц среды.

Величина  $\Sigma$ , названная модулем абразивного изнашивания, зависит только от природы абразива и свойств материала. Она является неким комплексным параметром, характеризующим микромеханику абразивного изнашивания в данной трибо-

системе [6]. Модуль  $\Sigma$ , являющийся константой, не зависящей от динамического состояния среды, может быть выражен в функции от физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Полагая, что рабочая камера не является сильно вытянутой или сплюснутой вдоль оси, можно выразить высоту загрузки  $H$  через рабочий объем  $v$  камеры. Тогда формула, определяющая «гидростатическое» давление, создаваемое в рабочей камере, будет иметь вид

$$p = \rho \cdot g \cdot H = \rho \cdot g \cdot \sqrt[3]{v}. \quad (3)$$

Для определения скорости потока среды учтем то, что в состоянии установившегося движения потока по вибрирующей поверхности скорость потока пропорциональна виброскорости самой поверхности. Согласно [1], максимальная скорость циркуляционного движения среды внутри U-образной камеры определяется соотношением

$$v_{max} = \frac{A \cdot \omega}{2} = \frac{A \cdot 2\pi \cdot f}{2} = A \cdot \pi \cdot f, \quad (4)$$

справедливость которого доказана независимыми экспериментальными результатами [6].

Подставляя (4) и (3) в (2), получим

$$\gamma_{уд} = \frac{\rho \cdot A \cdot \pi \cdot f}{\Sigma} \cdot \left( \frac{A^2 \cdot f^2}{2} + \pi \cdot g \cdot \sqrt[3]{v} \right). \quad (5)$$

В полученном выражении  $\rho$ ,  $\Sigma$  характеризуют свойства обрабатываемой среды, а  $A$ ,  $f$ ,  $\sqrt[3]{v}$  - динамический режим и размеры камеры.

Однако, основываясь на анализе экспериментальных данных, представленных в [3; 5], следует отметить существенный недостаток формулы (5), а именно отсутствие в ней пороговой амплитуды и пороговой частоты колебаний, ниже которых движение гранулированной органической среды и, следовательно, съём материала отсутствуют.

На рис. 1 приведены результаты измерения скорости потока при вариации амплитуды и частоты вибрации камеры.

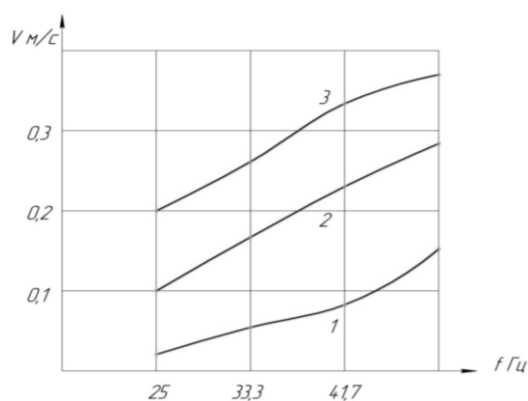


Рис. 1. Зависимость циркуляционной скорости потока среды от амплитуды и частоты вибрации камеры [1]: 1 -  $A=0,5$  мм; 2 -  $A=1,5$  мм; 3 -  $A=2,5$  мм

В работе [1] исследовалась зависимость съема металла от амплитуды колебаний на станке с U-образной камерой объемом 25 л, загруженной на 2/3. Эксперименты проводились без использования технологической жидкости. Абразивная среда - дробленая крошка - промывалась

кальцинированной содой. Частота колебаний равнялась 25 Гц. По результатам исследований были построены графические зависимости, представленные на рис. 2, на которых хорошо виден рост съема с увеличением амплитуды колебаний.

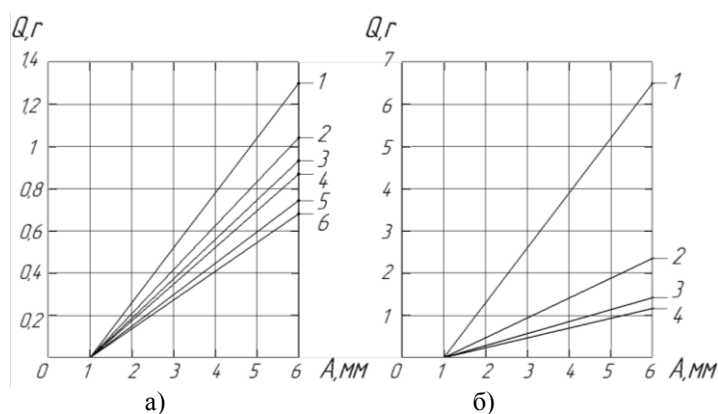


Рис. 2. Зависимость массового съема металла с образцов от амплитуды колебаний (абразив ЭБ63СТК грануляции 25-40 мм, частота - 25 Гц, время - 3 ч):  
а: 1 - СЧ-12-28; 2 - Ст3; 3 - ПФ-КЧ; 4 - сталь 45; 5 - Ст6 (закал.); 6 - У10А(закал.);  
б: 1 - баббит Б-83; 2 - бронза Бр014; 3 - Д1; 4 - А13[1]

Как следует из рис. 2, пороговой амплитудой является амплитуда несколько меньше 1 мм. Анализ достаточно большого числа экспериментальных данных показывает, что пороговая амплитуда зависит от частоты вибрации. Причем с ростом частоты пороговая амплитуда снижается. Обоснование этого явления содержится в работе [7], посвященной динамике сыпучих тел, подвергаемых вибрации. Анализ уравнений динамики частиц, находящихся на шероховатой вибрирующей поверхности, показывает, что движение в режиме «с

подбрасыванием» (а именно такой режим реализуется в вибростанках) может начаться при величине виброперегрузки [7]

$$\Gamma = A \cdot \omega^2 / g > 1,$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения.

Возвращаясь к рис. 2, убеждаемся, что при частоте 25 Гц, на которой проводился опыт, пороговой амплитудой будет

$$A_0 \cdot \omega^2 \geq g \Rightarrow A_0 \cong \frac{g}{4\pi \cdot f^2}, A_0 > 0,4 \text{ мм.} \quad (6)$$

Как следует из [7], величина  $A_0$  зависит от трения частиц о несущую поверхность, толщины слоя частиц и их плотности. Однако при отсутствии уплотняющих факторов  $A_0$  может с достаточной степе-

нью точности (ошибка до 15%) определяться из формулы (6).

С учётом представленных выше исследований зависимость удельного объёмного съема (5) с учётом пороговой амплитуды запишем следующим образом:

$$\gamma_{уд} = \frac{\rho(A - A_0) \cdot f}{\Sigma} \cdot \left( \frac{(A - A_0)^2 \cdot f^2}{2} + \pi g \sqrt[3]{v} \right), A > A_0.$$

Приведенные на рис. 3 зависимости показывают, что при малых частотах, когда движение среды отсутствует, съема металла не наблюдается. С увеличением частоты выше некоторой оптимальной, соответствующей наиболее интенсивному движению загрузки, прирост съема снижается.

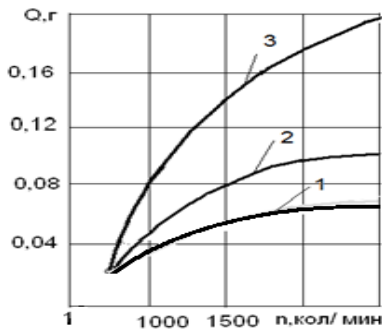


Рис. 3. Зависимость массового съема металла с образцов от частоты колебаний (абразив ЭБ63СТК грануляции 25-40 мм, амплитуда - 1,5 мм, время - 1 ч): 1 - бронза Бр014; 2 - Al3; 3 - сталь Ст3 [1]

$$\gamma_{уд} = \frac{\rho \cdot (A - A_0) \cdot (f - f_0)}{\Sigma} \cdot \left( \frac{(A - A_0)^2 \cdot (f - f_0)^2}{2} + \pi \cdot g \cdot \sqrt[3]{v} \right); A > A_0, f > f_0.$$

Выразим модуль  $\Sigma$  в функции от физико-механических характеристик обрабатываемого материала, в частности от его твёрдости:  $\Sigma = K \cdot HV$ , где  $K$  - экспериментально устанавливаемый комплексный коэффициент, характеризующий физико-механические и биологические свойства

гранул органической среды, а также условия обработки (с применением технологической жидкости или без неё). Получим совокупность зависимостей, описывающих процесс виброобработки органическими гранулированными средами, состоящими из дробленых косточек плодовых деревьев:

$$\gamma_{уд} = \frac{\rho \cdot (A - A_0) \cdot (f - f_0)}{K \cdot HV} \cdot \left( \frac{(A - A_0)^2 \cdot (f - f_0)^2}{2} \right) + \pi \cdot g \cdot \sqrt[3]{v};$$

$$A > A_0, f > f_0;$$

$$A_0 = \pi \cdot \frac{g}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_0^2};$$

$$\frac{H}{L} \cong 1; \frac{H}{d_q} > 6; \frac{(A \cdot \omega)^2}{g \cdot H} < 0,5.$$

## Выводы

Полученные в результате моделирования зависимости съема металла и условия, представленные в виде неравенств, которые соответствуют стационарному циркуляционному движению органической гранулированной среды, обеспечивают эффективность виброотделки поверхности

деталей косточковыми органическими средами. Неучет этих условий может привести к тому, что динамическое состояние процесса будет отличаться от нормального, а формула для металлосъема станет некорректной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. - 2-е изд., перераб. и доп. - Ростов н/Д: ДГТУ, 2008. - 693 с.
2. Тамаркин, М.А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / М.А. Тамаркин. - Ростов н/Д, 1995. - 32 с.
3. Шевцов, С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах / С.Н. Шевцов. - Ростов н/Д: СКНЦ ВШ, 2001. - 194 с.
4. Яцун, С.Ф. Вычислительный эксперимент в динамике сыпучих материалов / С.Ф. Яцун, Е.В. Журавлева // Вибрационные машины и технологии: сб. докл. IV науч.-техн. конф. - Курск, 1999. - С. 143-147.

1. Babichev, A.P. *Vibration Technology Fundamentals* / A.P. Babichev, I.A. Babichev. - 2-d Edition revised and expanded. - Rostov-upon-Don: DSTU, 2008. - pp. 693.
2. Tamarkin, M.A. Optimization technological fundamentals of parts machining with free abrasives: *Author's Abstract of D. Eng. Thesis* / M.A. Tamarkin. - Rostov-upon-Don, 1995. - pp. 32.
3. Shevtsov, S.N. *Computer Simulation of Granulated Media Dynamics in Vibrating Technological Machines* / S.N. Shevtsov. - Rostov-upon-Don: SKNC VSh, 2001. - pp. 194.
4. Yatsun, S.F. Computer experiment in bulk material dynamics / S.F. Yatsun, E.V. Zhuravlyova // *Vibrating Machines and Techniques: Proceedings of the IV-th Scientific-Pract. Conf.* - Kursk, 1999. - pp. 143-147.

5. Лебедев, В.А. Повышение эффективности вибрационной отделочной обработки деталей на основе применения сред органического происхождения / В.А. Лебедев, Е.Ю. Крупеня, А.П. Шишкина // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: кол. моногр. / под ред. А.Н. Киричика. - М.: Спектр, 2015. - Т. 6. - С. 268-326.
6. Bremen, C.E. Vertical oscillation of a bed of granular material / C.E. Bremen, S. Ghosh, C.R. Wassgren // *J. of Appl. Mech.* - 1996. - Vol. 63. - № 1. - P. 156-161.
7. Блехман, И.И. Поведение сыпучих тел под действием вибраций / И.И. Блехман, Э.Э. Лавендел, И.Ф. Гончаревич // Вибрации в технике. - М.: Машиностроение, 1979. - Т. 4. - С. 78-98.

5. Lebedev, V.A. Efficiency increase of parts vibration finishing based on application of media of organic origin / V.A. Lebedev, E.Yu. Krupenya, A.P. Shishkina // *Efficient Engineering Technologies, Equipment and Tools: author group's monograph* / under the editorship of A.N. Kirichek. - M.: Spectrum, 2015. - Vol. 6. - pp. 268-326.
6. Bremen, C.E. Vertical oscillation of a bed of granular material / C.E. Bremen, S. Ghosh, C.R. Wassgren // *J. of Appl. Mech.* - 1996. - Vol. 63. - № 1. - P. 156-161.
7. Blekhman, I.I. Bulk material behavior affected with vibrations / I.I. Blekhman, E.E. Lavendel, I.F. Goncharevich // *Vibration in Engineering.* - M.: Mechanical Engineering, 1979. - Vol. 4. - pp. 78-98.

Статья поступила в редколлегию 27.03.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Донского государственного технического университета  
Бабичев А.П.

## Сведения об авторах:

**Шишкина Антонина Павловна**, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технологического университета, e-mail: [shishkina56646@yandex.ru](mailto:shishkina56646@yandex.ru).

**Лебедев Валерий Александрович**, к.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технологического университета, e-mail: [va.lebidev@yandex.ru](mailto:va.lebidev@yandex.ru).



**Чаава Михаил Мегонович**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государ-

**Shishkina Antonina Pavlovna**, Post graduate student of the Dep. “Engineering Techniques”, Don State Technological University, e-mail: [shishkina56646@yandex.ru](mailto:shishkina56646@yandex.ru).

ственного технологического университета, e-mail: [miho\\_ch@list.ru](mailto:miho_ch@list.ru).

**Lebedev Valery Alexandrovich**, Can. Eng., Prof. of the Dep. “Engineering Techniques”, Don State Technological University, e-mail: [va.lebidev@yandex.ru](mailto:va.lebidev@yandex.ru).

**Chaava Mikhail Megoнович**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Techniques”, Don State Technological University, e-mail: [miho\\_ch@list.ru](mailto:miho_ch@list.ru).

УДК 621.9

DOI: 10.12737/article\_59b11cbb105807.51899061

Б.Я. Мокрицкий, А.В. Морозова, Я.В. Конюхова, Е.Б. Мокрицкая

## ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ КОЛЁС ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ

Для повышения эффективности стружкодробления без снижения производительности и качества восстановительной обработки колёс железнодорожных вагонов использованы методы механики деформируемого твёрдого тела, позволяющие

оптимизировать топографию передней поверхности тангенциальной режущей пластины.

**Ключевые слова:** восстановительная обработка, колесо, железнодорожный вагон, дробление стружки, эксплуатационный дефект.

B.Ya. Mokritsky, A.V. Morozova, Ya.V. Konyukhova, E.B. Mokritskaya

## PECULIARITIES IN REDUCTION TREATMENT OF RAILROAD CAR WHEELS

The problems of wheel-turning reduction treatment are connected with both a large quantity of wheels under treatment, and with a large amount of material removed from the surface of wheel tread in connection with defects arisen during the car operation. In the course of the wheel reduction treatment the continuous chip is formed, which is traumatic and difficult for removal and transportation.

The well-known solutions on chip crushing for wheel turning have a special character and are carried out at the expense of the cutting face complex geometry of cutter plates. At present the production of domestic competitive cutter plates is not carried out, which makes one of the urgent problems for recovery production the solution of which is based on import substitution of the equipment operated.

The purpose of this work consists in chip breaking efficiency increase without decrease of productivity and quality of the reduction treatment of railroad car wheels.

To achieve the purpose the methods of the mechanics of solid deformation are used allowing the optimization of the cutting face topography of the tangential cutter plate. Power, supplied for cutting with the developed plates, is lesser of that essential for cutting with *Pramet* plates used at present in recovery production which witnesses the formation of more favorable cutting conditions and lesser values of a cutting force.

Plate tests have shown positive results.

**Key words:** reduction treatment, wheel, railroad car, chip breaking, operational defect.

### Введение

В процессе эксплуатации колёс железнодорожных вагонов поверхность катания колёс претерпевает значительные изменения, её материал деформируется,

формируются различные дефекты (рис. 1). Это требует восстановительной обработки колёс.



а)



б)

Рис. 1. Примеры эксплуатационных дефектов: а - типа «выщерблина»; б - типа «навар»

Проблемы колёсотокарной восстановительной обработки связаны как с большим количеством обрабатываемых колёс, так и с большим объёмом материала, удаляемого с поверхности катания колеса в связи с его дефектами, образующимися в процессе эксплуатации вагона. В ходе восстановительной обработки колёс образуется сливная стружка, которая травмоопасна и неудобна для уборки и транспортирования.

Известные решения по дроблению стружки для колёсотокарной обработки носят частный характер и осуществляются за счёт сложной геометрии передней поверхности режущих пластин. В настоящее время выпуск конкурентных отечественных режущих пластин не осуществляется, что составляет одну из острых проблем для восстановительного производства, решение которой основано на импортозамещении используемого на производстве оборудования.

С рассматриваемой авторами позиции наиболее затруднительна обработка колёс, на которых в процессе эксплуатации образовались дефекты в виде трещин, которые распространились вглубь на 5 мм и более. Это означает, что весь металл с обода колеса на глубину трещины (и более) необходимо удалить. При колёсотокарной обработке его стремятся удалить за один проход, т.е. при глубине резания, превышающей глубину залегания трещины. Образующаяся при этом стружка в районе галтели колеса (переход с цилиндрической части обода колеса к его гребню) крайне травмоопасна. Разделение глубины на 2 или более проходов резко снижает производительность обработки и не исключает появления сливной стружки. Такая же проблема существует при восстановительной обработке колёс локомотивов (рис. 2).



Рис. 2. Колёсная пара локомотива с восстановленной поверхностью

Типичные примеры сливной стружки, полученной при обработке тангенциальной режущей пластиной формы и типоразмера *LNUX 301940* при глубине резания 3...5 мм, показаны на рис. 3. Статистика

травм от такой стружки имеется. Количество травм и характер повреждения рук человека (особенно стружкой, показанной на рис. 3б) подчёркивают актуальность рассматриваемой проблемы.

### Обсуждение полученных результатов

Ведущие в мире инструментальные фирмы решают проблему дробления стружки за счёт сложной топографии передней поверхности режущих пластин (рис. 4). Но и это не решает проблемы, потому что при обработке галтелей колёс в большинстве случаев образуется сливная стружка. Более того, и прочность таких пластин оказывается недостаточной в случаях, когда на колесе встречается значительный дефект (например типа «ползун»). Пример разрушения этих пластин показан на рис. 5.

Авторами выполнены разработка и исследования тангенциальных пластин с оригинальной топографией передней поверхности [1 - 7]. Изготовление их в условиях ПАО «Кировоградский завод твёрдых сплавов» не обеспечило должного качества, но их производственные испытания подтвердили правильность принятой концепции. Примеры стружек, полученных

при использовании этих пластин в тех же условиях эксплуатации, в которых были получены стружки, представленные на рис. 3, приведены на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что такая стружка травмобезопасна, удобна при уборке со станка и для транспортирования в автомобиле или железнодорожном вагоне. Мощность, затрачиваемая на резание разработанными пластинами, меньше мощности, необходимой для резания пластинами фирмы *Pramet*. Это свидетельствует о создании более благоприятных условий резания и меньших значениях силы резания. Вместе с тем следует отметить, что прочность разработанных пластин (рис. 5в) оставляет желать лучшего. Для устранения этого недостатка ведутся работы по совершенствованию конструкции пластин и упрочнению используемого для их изготовления материала.



а)



б)



в)

Рис. 3. Примеры тонкой травмобезопасной сливной стружки (а, б) и тангенциальной режущей пластины формы и типоразмера *LNUX 301940* (в)

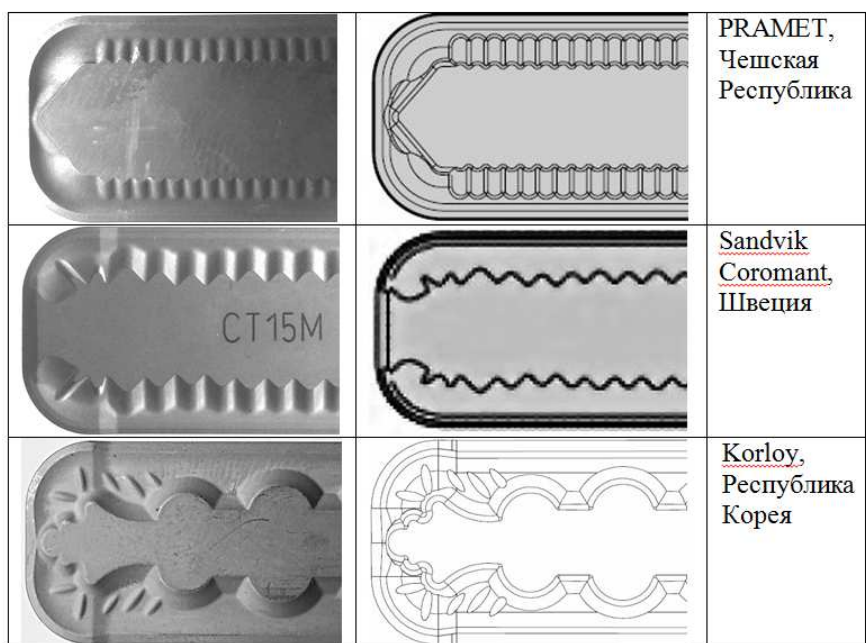


Рис. 4. Внешний вид и схемное изображение передней поверхности тангенциальных режущих колёсотокарных пластин некоторых зарубежных производителей



а)



б)



в)

Рис. 5. Примеры разрушения пластин: а - фирмы *Pramet*; б - фирмы *Kenenmetell*; в - разработанных с участием авторов и имеющих типовую топографию передней поверхности



а)



б)

Рис. 6. Примеры стружек, полученных при обработке галтели (а) и цилиндрического участка (б) поверхности катания колеса грузового железнодорожного вагона

## Выводы

Проблема разработки эффективных конструкций колёсотокарных пластин не исчерпана. В развитие решения проблемы возможна разработка новых вариаций и сочетаний стружкоформирующих элементов и участков на передней поверхности для повышения эффективности стружкодробления. Есть основания полагать, что этому может способствовать более тщательный анализ особенностей стружкообразования на различных этапах обработки колеса.

Разработка известных конструкций пластин осуществлялась для обеспечения максимальной производительности обработки и максимального периода износоустойчивости. Обеспечение стружкодробления не стояло основной задачей. Выполненные исследования показали, что можно обеспечить эффективное стружкодробление на всех этапах обработки колеса без снижения производительности обработки и периода стойкости инструмента.

*Часть экспериментальных результатов получена лично В.В. Алтуховой. Авторы выражают ей благодарность за помощь в подготовке материала для публикации.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 134465 РФ, МПК В23В 27/16 на полез. модель. Колёсотокарная пластина / Алтухова В.В., Мокрицкий Б.Я., Тарануха Г.В.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2013107815/02; заявл. 21.02.13; опубл. 20.11.13, Бюл. № 32.
2. Пат. 134466 РФ, МПК В23В 27/16 на полез. модель. Пластина колёсотокарная чашечная / Алтухова В.В., Мокрицкий Б.Я., Тарануха Г.В.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2013107816/02; заявл. 21.02.13; опубл. 20.11.13, Бюл. № 32.
3. Пат. 2528301 РФ на изобрет. Режущая пластина колёсотокарная чашечной формы со стружколомающим рельефом на передней поверхности / Алтухова В.В., Мокрицкий Б.Я., Тарануха Г.В.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2013107812/02; заявл. 21.02.13; опубл. 10.09.14, Бюл. № 25.
4. Мокрицкий, Б.Я. Стружка сливной формы как мезомеханический фактор дестабилизации процесса резания в условиях тяжёлого машиностроения / Б.Я. Мокрицкий, В.В. Алтухова // СТИН. - 2014. - № 4. - С. 28-32.
5. Мокрицкий, Б.Я. Управление эксплуатационными показателями при восстановительной обработке изделий / Б.Я. Мокрицкий, А.И. Евстигнеев, Е.Г. Кравченко, В.В. Алтухова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2014. - № 12. - С. 11-12.
6. Mokritskii, B.Va. Control of operational indicators during restorative machining of articles / B.Va. Mokritskii, A.I. Evstigneev, E.G. Kravchenko, V.V. Altukhova // Chemical and Petroleum Engineering. - 2015. - Vol. 50. - Nos. 11-12.
7. Mokritskii, B.Va. Continuous Chip as a Mesomechanical Factor Destabilizing the Cutting Process in Heavy Manufacturing / B.Va. Mokritskii, V.V. Altukhova // Russian Tangining Research. - 2014. - Vol. 34. - № 11. - P. 725-729.

1. Pat. 134465 the RF, IPC V23V 27/16 for utility model. Wheel-turning plate / Altukhova V.V., Mokritsky B.Ya., Taranukha G.V.; Patent holder: Komsomolsk-upon-Amur State Technical University. - № 2013107815/02; applied. 21.02.13; published 20.11.13, Bull. № 32.
2. Pat. 134466 the RF, IPC V23V 27/16 for utility model. Wheel-turning cup plate / Altukhova V.V., Mokritsky B.Ya., Taranukha G.V.; Patent holder: Komsomolsk-upon-Amur State Technical University. - № 2013107816/02; applied. 21.02.13; published 20.11.13, Bull. № 32.
3. Pat. 2528301 the RF for invention. Cutter plate of wheel-turning cup form with chip breaking relief on cutting face / Altukhova V.V., Mokritsky B.Ya., Taranukha G.V.; Patent holder: Komsomolsk-upon-Amur State Technical University. - № 2013107812/02; applied. 21.02.13; published. 10.09.14, Bull. № 25.
4. Mokritsky, B.Ya. *Continuous Chip as Mesomechanics Factor of Cutting Destabilization under Conditions of Heavy Engineering* / B.Ya. Mokritsky, V.V. Altukhova // STIN. - 2014. - № 4. - pp. 28-32.
5. Mokritsky, B.Ya. Operation indices control at product reduction treatment / B.Ya. Mokritsky, A.I. Yevstigneyev, E.G. Kravchenko, V.V. Altukhova // *Chemical and Oil-Gas Engineering*. - 2014. - № 12. - pp. 11-12.
6. Mokritskii, B.Va. Control of operational indicators during restorative machining of articles / B.Va. Mokritskii, A.I. Evstigneev, E.G. Kravchenko, V.V. Altukhova // *Chemical and Petroleum Engineering*. - 2015. - Vol. 50. - Nos. 11-12.
7. Mokritskii, B.Va. Continuous Chip as a Mesomechanical Factor Destabilizing the Cutting Process in Heavy Manufacturing / B.Va. Mokritskii, V.V. Altukhova // *Russian Tangining Research*. - 2014. - Vol. 34. - № 11. - P. 725-729.

*Статья поступила в редколлегию 25.04.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета  
Ким В.А.*

#### Сведения об авторах:

**Мокрицкий Борис Яковлевич**, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, e-mail: [boris@knastu.ru](mailto:boris@knastu.ru).

**Морозова Анна Валентиновна**, к.социол.н., Брянский государственный технический университет, e-mail: [niotiosu@gmail.com](mailto:niotiosu@gmail.com).

**Mokritsky Boris Yakovlevich**, Prof. of the Dep. "Engineering Techniques", Komsomolsk-upon-Amur State Technical University, e-mail: [boris@knastu.ru](mailto:boris@knastu.ru).

**Morozova Anna Valentinovna**, Can. Sociol., Bryansk State Technical University, e-mail: [niotiosu@gmail.com](mailto:niotiosu@gmail.com).

**Конюхова Яна Васильевна**, студентка Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, e-mail: [konyukhva.ia.v@mail.com](mailto:konyukhva.ia.v@mail.com).

**Мокрицкая Елена Борисовна**, доцент кафедры «Вычислительные системы» Дальневосточного федерального университета, e-mail: [mokritskayae@mail.ru](mailto:mokritskayae@mail.ru).

**Konyukhova Yana Vasilievna**, Student of Komsomolsk-upon-Amur State Technical University, e-mail: [konyukhva.ia.v@mail.com](mailto:konyukhva.ia.v@mail.com).

**Mokritskaya Elena Borisovna**, Assistant Prof of the Dep. "Computer Systems", Far-Eastern Federal University, e-mail: [mokritskayae@mail.ru](mailto:mokritskayae@mail.ru).

УДК 621.891

DOI: 10.12737/article\_59b11cb8d75888.78880569

В.П.Тихомиров, А.О.Горленко, М.А.Измеров, А.Н.Ерохин

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Представлена методика расчёта сферического подшипника скольжения с учётом наличия шероховатости. Задача решается путём моделирования шероховатого слоя с помощью построения фрактальных 3D-моделей и определения параметров контактирования гладкого шара с полупространством при наличии шероховатости с эквива-

лентными параметрами. Шероховатый слой при этом представляется в виде сплошного покрытия с переменным модулем упругости.

**Ключевые слова:** сферический подшипник скольжения, статическая грузоподъёмность, контакт поверхностей, фрактальная размерность, моделирование, деформация.

V.P. Tikhomirov, A.O. Gorlenko, M.A. Izmerov, A.N. Yerokhin

## MODELING OF CONTACT INTERACTION OF SPHERICAL SURFACES OF BEARINGS OF SLIDING

The solution of contact problems taking into account surface micro-geometry entailed certain difficulties: a surface roughness has a complex structure having a random component, but for all that it affects considerably a conjugation load capacity. The account of the impact of a rough surface with different factors results in a substantial distortion of the result. In addition at the stage of distortion design an engineer is not aware initially of the quality of future surfaces which are to be matched for the best result.

The procedure presented in this work allows fulfilling a computation of a spherical plain bearing taking into account the impact of conjugated surfaces roughness. The problem is solved through the simulation of a

rough layer with the aid of the formation of fractal 3D models and parameter definition of the contact of a smooth ball with a half-space at the presence of roughness with equivalent parameters. A rough layer at that is as a 3D continuous coating with fractal geometry equivalent to a real surface and with a variable coefficient of elasticity depending upon a fractal dimensionality and degree of coating deformation. It allows increasing considerably the computation accuracy, automating and accelerating a designing process.

**Key words:** spherical plain bearing, static load capacity, surfaces contact, fractal dimensionality, simulation, deformation

### Введение

Для оценки грузоподъёмности сферического подшипника скольжения необходимо рассмотреть задачу контактного взаимодействия элементов сферического подшипника, которую можно упростить, приведя внутренний контакт двух сферических поверхностей к контакту гладкого шара, имеющего приведенный радиус кривизны, с плоскостью (упругим полупространством). Затем, вводя понятие эквивалентной шероховатости, приведем контактную задачу к задаче взаимодействия гладкого шара с полупространством при наличии шероховатого слоя. При этом шероховатый слой представляется в виде

сплошного покрытия с переменным модулем упругости.

Особенностью данного подхода является представление шероховатого слоя в виде фрактального объекта и его моделирование сплошным покрытием с толщиной, определяемой высотными параметрами шероховатости поверхностей, и модулем упругости, зависящим от уровня деформации эффективного шероховатого слоя и фрактальной размерности.

Рассмотрим подробнее процедуру оценки грузоподъёмности сферического подшипника скольжения.

**1. Оценка приведенных параметров сферического подшипника.** Приведем схему внутреннего контакта сфериче-

ских поверхностей к схеме контакта «шар – плоскость (упругое полупространство)». Тогда жесткий гладкий шар имеет приве-



денный радиус кривизны

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1},$$

где  $R_1, R_2$  – радиусы соответственно внутренней сферы и сферической обоймы (оба тела гладкие).

Приведенный модуль упругости имеет вид

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}$$

Здесь  $E_1, E_2$  – модули упругости;  $\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты Пуассона обоих тел.

**2. Учет шероховатости сопряженных поверхностей.** Анализ и исследование параметров шероховатости достаточно полно изложены в работах [1 – 5].

К параметрам шероховатости поверхности, оказывающим существенное влияние на контактное взаимодействие поверхностей, можно отнести максимальные высоты неровностей  $R_{max1}, R_{max2}$ . Схема контакта следующая: гладкая жесткая сфера находится в контактом взаимодействии с полупространством при наличии на нем эквивалентной шероховатости. Эквивалентная шероховатость имеет толщину

$$R_{max} = R_{max1} + R_{max2}.$$

Покрытие имеет прочное сцепление с основанием. Рассматриваемый шероховатый слой представим в виде фрактального

объекта, профиль поверхности которого характеризуется фрактальной размерностью  $D$  ( $1 < D < 2$ ). Шероховатый слой представляет собой распределение материала по высоте и описывается опорной кривой Аббота - Фейерстоуна. Полагаем, что покрытие как фрактальный объект имеет фрактальный модуль упругости, зависящий от структурных особенностей шероховатого слоя (от фрактальной размерности) и степени деформации покрытия.

**3. Определение фрактальной эквивалентной шероховатости** является отдельной самостоятельной задачей. Сформулируем её так: известны фрактальные размерности шероховатых поверхностей сфер  $D_1, D_2$ , требуется найти поверхность, имеющую эквивалентную фрактальную размерность.

$$D = f(D_1, D_2).$$

Фрактальная размерность эквивалентной шероховатости двух сфер определяется в следующей последовательности. Построим поверхности с фрактальными размерностями  $D_1, D_2$ . Типичные поверхности с разными фрактальными размерностями, но с одинаковым масштабом представлены на рис. 1.

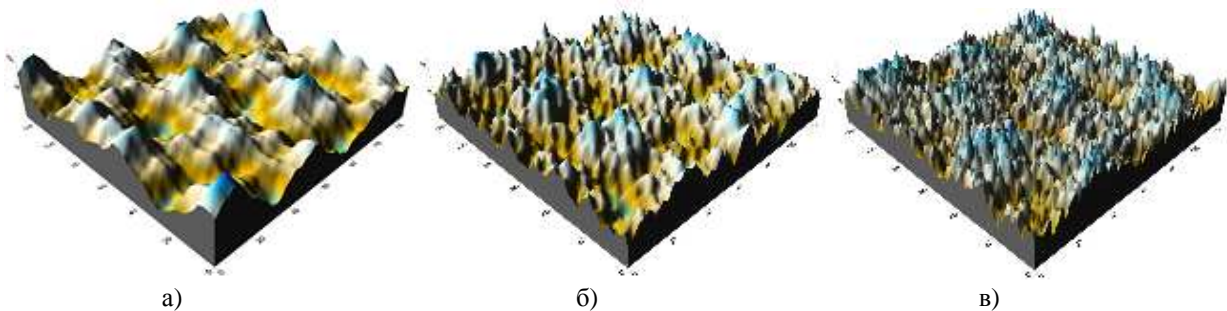


Рис. 1. Модели фрактальных поверхностей: а -  $D = 1,2$ ; б -  $D = 1,5$ ; в -  $D = 1,7$

При этом связь между фрактальными размерностями профиля и поверхности выражается зависимостью

$$D = D_s - 1.$$

Приведем соответствующие сферам шероховатые поверхности в соприкосновение на уровне, когда можно выделить не менее пяти пятен контакта (рис. 2). Анализ полученных пятен контакта дает возможность определить фрактальную размерность сочетания фрактальных поверхно-

стей. Полагаем, что эта фрактальная размерность характеризует эффективную шероховатость.

Увеличенные в масштабе пятна контакта подвергаются анализу. Эффективная фрактальная размерность, определяемая с помощью метода «периметр  $P$  – площадь  $A$ » для каждого пятна, выражается зависимостью

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2 \ln P_i}{\ln A_i}$$

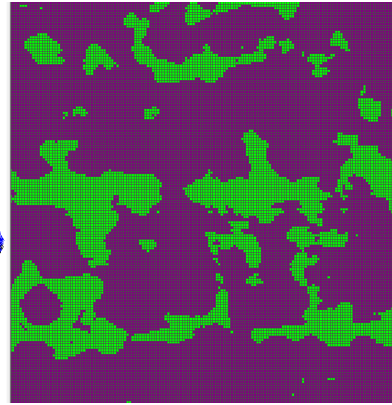
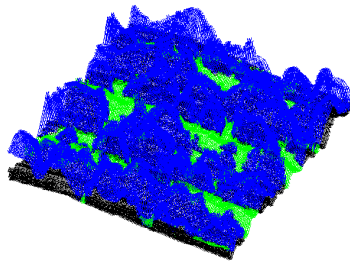


Рис. 2. Сопряжение шероховатых поверхностей и пятна контакта

**4. Теория Герца.** Деформации и напряжения, возникающие при взаимном сжатии двух соприкасающихся тел, называются контактными. Передача давлений в месте касания происходит по малым площадкам. Материал в зоне такой площадки находится в объемном напряженном состоянии, не имея возможности свободно деформироваться. Контактные напряжения имеют местный характер, быстро убывая по мере удаления от площадки контакта. Расчеты и исследования показывают, что материал, подверженный всестороннему давлению в зоне контакта, может выдержать большое давление, не пропорциональное приложенной силе. Задача контактирования двух упругих гладких тел рассматривалась Г. Герцем (H. Herz, 1881). В основу решений контактных задач положены следующие допущения:

- Площадки контакта малы по сравнению с поверхностями соприкасаемых тел.
- Материал соприкасающихся тел однороден и изотропен, поверхности тел гладкие.
- Силы давления, распределенные по площадке контакта, нормальны к этой поверхности (силами трения в данном случае пренебрегают).
- Оба тела в точке касания имеют общую касательную поверхность и общую нормаль, вдоль которой направлены сжимающие усилия  $F$ .
- Смазочный материал в зоне контактирования отсутствует.

Схема контакта между шаром и упругим полупространством представлена на рис. 3.

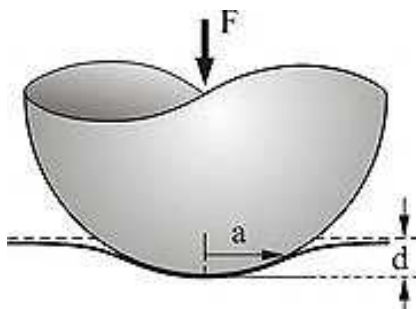


Рис. 3. Контакт шара с упругим полупространством

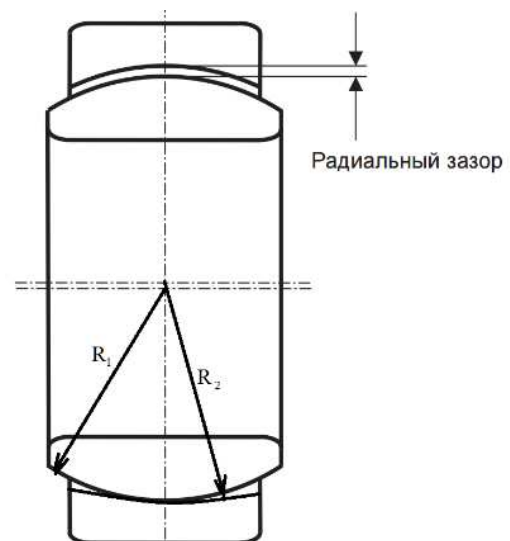


Рис. 4. Сферический контакт

Твёрдый шар радиусом  $R$  вдавливаются в упругое полупространство на глубину  $d$  (глубина проникновения), образуя область контакта радиусом  $a = \sqrt{Rd}$ . Необходимая для этого сила равна

$$F = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} d^{3/2}$$

Здесь  $E^*$  - приведенный модуль упругости.

Сферический контакт подшипника (рис. 3) приводится к схеме, показанной на рис. 4. При контакте двух шаров с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  все уравнения справедливы для приведенного радиуса  $R$ . При этом распределение давления в площади контакта определяется по формуле

### 5. Упругопластический контакт.

На рис. 5 показана деформация отдельной неровности в виде сферического сегмента гладким жестким штампом.

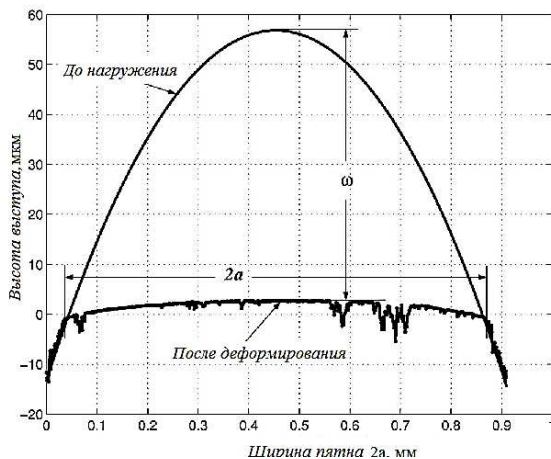


Рис. 5. Деформация выступа сферической формы

$$F_{e-p1}^* = 1,03(\omega^*)^{1,425}; \quad F_{e-p1}^* = F_{e-p1}/F_c; \quad A_{e-p1}^* = A_{e-p1}/A_c = 0,93(\omega^*)^{1,136}.$$

• Упругопластический контакт  $e-p_2$  ( $6 < \omega^* \leq 110$ ):

$$F_{e-p2}^* = 1,40(\omega^*)^{1,263}; \quad F_{e-p2}^* = F_{e-p2}/F_c; \quad A_{e-p2}^* = A_{e-p2}/A_c = 0,94(\omega^*)^{1,146}.$$

• Пластический контакт  $p$  ( $\omega^* > 110$ ):

$$F_p = 2\pi R\omega H; \quad A_p = 2\pi R\omega.$$

Критическая величина деформации равна  $\omega_c = \left(\frac{\pi KH}{2E^*}\right)^2 R$ , где  $E^*$  - приведенный модуль упругости;  $K$  - коэффициент ( $K = 0,454 + 0,41\mu$ );  $H$  - твердость;  $R$  - радиус сферы.

**6. Контакт сферы с шероховатым полупространством.** Полагаем, что шероховатая поверхность изотропна. В этом случае для определения параметров шеро-

$$p = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{1/2}$$

где максимальное давление в центре

$$p_0 = \frac{2}{\pi} E^* \left(\frac{d}{R}\right)^{1/2}$$

Площадь круговой площадки

$$A^0 = \pi a^2 - \pi R d = \pi \left(\frac{3FR}{4E^*}\right)^{2/3},$$

величина деформации

$$d = 0,825^3 \sqrt{\frac{F^2}{(E^*)^2 R}}$$

В этом случае основные соотношения при упругопластическом деформировании приняты следующими ( $\omega$  - величина деформации микронеровности;  $F$  - нагрузка на микровыступ;  $A$  - площадь пятна контакта; индекс  $c$  обозначает критическую деформацию, соответствующую переходу от упругого состояния к пластическому):

• Упругий контакт  $e$  (наблюдается при условии  $\omega^* = \frac{\omega}{\omega_c} < 1$ ):

$$F_e = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R\omega^2};$$

$$F_e^* = F_e/F_c = (\omega^*)^{3/2}; \quad A_e = \pi R\omega;$$

$$A_e^* = A_e/A_c = \omega^*.$$

• Упругопластический контакт  $e-p_1$  ( $1 \leq \omega^* \leq 6$ ):

хватости достаточно провести анализ профилограммы. В случае множественного контакта используют вероятностное распределение вершин выступов. Так как шероховатый слой определяет несущую способность контакта, то при моделировании поверхности следует обеспечить одинаковое распределение материала шероховатого слоя для реальной поверхности и ее мо-

дели.

Когда два тела с шероховатыми поверхностями взаимодействуют друг с другом, реальная площадь контакта  $A_r$  намного меньше, чем геометрическая площадь  $A_0$ . При контакте между плоскостью со случайно распределенной шероховатостью и упругим полупространством реальная площадь контакта пропорциональна нормальной силе  $F$  и определяется следующим приближенным уравнением:

$$A_r = \frac{k}{E^* Rq} F.$$

Здесь  $Rq$  – среднеквадратичное значение неровности шероховатой поверхности; коэффициент  $k \approx 2$ .

Среднее давление на реальной площади контакта рассчитывается в первом приближении как половина приведенного модуля упругости  $E^*$ , умноженного на среднеквадратичное значение неровности профиля поверхности  $Rq$ :

$$p = \frac{F}{A} \approx \frac{1}{2} E^* Rq$$

Если это давление больше твердости  $HВ$  материала, то тогда

$$\psi = \frac{E^* Rq}{HВ} > 2,$$

микронеровности находятся полностью в пластичном состоянии.

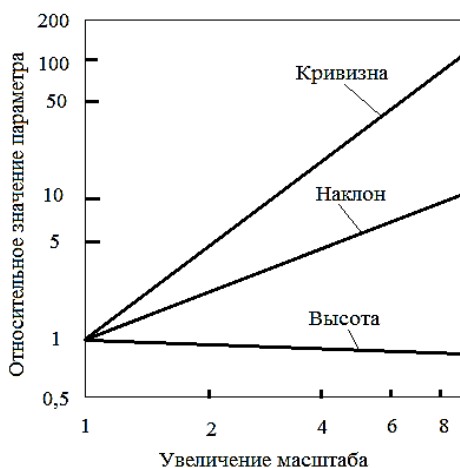


Рис. 6. Масштабная зависимость статистических параметров

Для состояния  $\psi < 2/3$  поверхность при контакте деформируется только упруго. Величина  $\psi$  была введена Гринвудом и Вильямсоном и носит название индекса пластичности. На основании анализа экспериментальных данных и аналитических

методов расчета параметров контактирования сферы с полупространством с учетом наличия шероховатого слоя был сделан вывод о том, что расчетные параметры зависят от деформации шероховатого слоя. При разработке модели контактирования сферического тела с шероховатой поверхностью следует учитывать полученные ранее результаты:

– при малых нагрузках давление для шероховатой поверхности меньше рассчитанного по теории Г. Герца и распределяется, как известно, по большей площади;

– применение широко используемой модели шероховатой поверхности в виде ансамбля тел правильной геометрической формы, вершины выступов которых подчиняются определенному закону распределения, приводит к значительным ошибкам при оценке параметров контактирования, особенно при малых нагрузках (Н.Б. Демкин);

– отсутствуют пригодные для расчета параметров контактирования простые выражения и недостаточно развита экспериментальная база.

**7. Фрактальная модель.** Поверхность состоит из большого числа наложенных друг на друга шероховатостей нескольких масштабов длины. Отклонение поверхности  $z(x,y)$  от срединной поверхности  $z(x,y) = 0$  считается случайным процессом, который характеризуется такими статистическими параметрами, как среднеквадратическое отклонение высоты  $Rq$ , наклона и кривизны. Из-за многомасштабной природы поверхности среднеквадратические значения указанных параметров значительно зависят от разрешающей способности измерительного прибора и от длины статистической выборки. Зависимость всех трех параметров от увеличения масштаба и пространственного разрешения [6] показана на рис. 6.

Масштабная зависимость означает, что приборы с различной разрешающей способностью и длиной сканирования дают разные значения этих статистических параметров для одной и той же поверхности. Таким образом, моделирование, основанное на этих параметрах, может привести к неоднозначным результатам для пары

взаимодействующих шероховатых поверхностей. Фрактальная характеристика шероховатой поверхности не зависит от масштаба и обеспечивает информацию о структуре шероховатости всех масштабов длины, обладающей фрактальными свойствами.

Профиль инженерной поверхности обладает свойствами непрерывности, не-

дифференцируемости и самоаффинности. Недифференцируемость связана с тем, что невозможно провести в любой точке профиля касательную, так как в этой точке будет возникать все больше деталей шероховатости. Статистическая самоаффинность обусловлена сходством вида профиля при различных увеличениях (рис. 7).

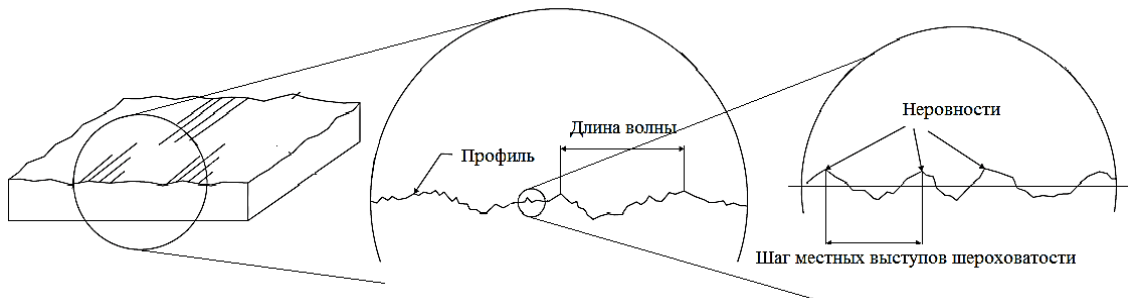


Рис. 7. Самоаффинность профиля

Фрактальный объект (кривая) обладает также свойством самоподобия: любой участок кривой имеет ту же фрактальную размерность, что и вся кривая. Длина фрактальной кривой (по Б. Мандельброту [7]) определяется по формуле

$$L = \lambda(\delta)^{1-D}.$$

Процедура определения длины фрактальной кривой на участке  $AB$  понятна из рис. 8.

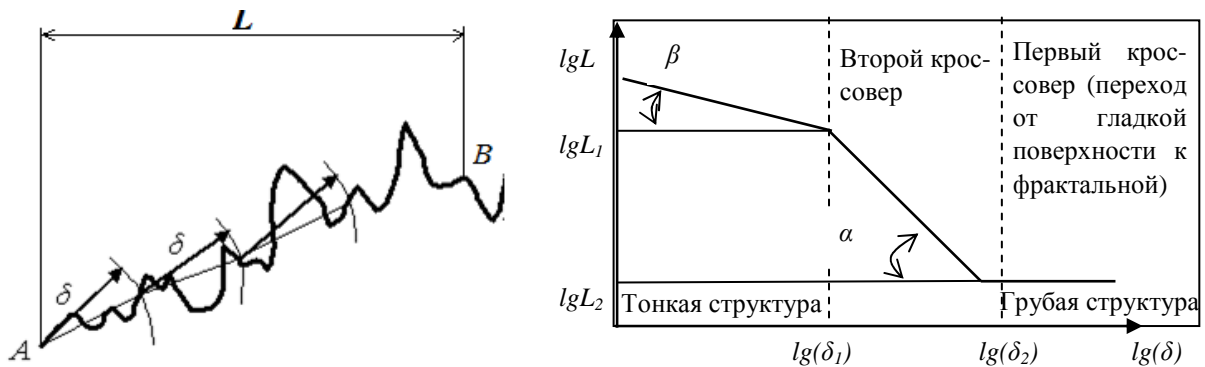


Рис. 8. Определение фрактальной размерности по углу наклона  $\alpha$

Длина кривой определяется выражением  $L=N(\delta)\delta$ . С уменьшением размера  $\delta$  длина нелинейно возрастает. Прологарифмировав представленное выше уравнение, запишем:

$$\ln L = \ln \lambda + (1 - D) \cdot \ln \delta.$$

Зависимость  $\ln L = f(\ln \delta)$  представим в виде графика (рис. 8), который от-

ражает мультифрактальную структуру фрактальной кривой (грубая и тонкая структуры). Отметим, что при длине волны, превышающей  $\delta_2$ , объект перестает быть фрактальным.

Наклон прямой на участке  $\delta_1 \dots \delta_2$  позволяет найти фрактальную размерность как

$$D = 1 - tg\alpha = 1 - \frac{lgL_1 - lgL_2}{-(lg\delta_1 - lg\delta_2)}, \quad 1 < D < 2.$$

Прологарифмировав исходное уравнение при  $L = L_1$  и  $\delta = \delta_1$  и преобразовав полученное выражение, получим:

$$\ln L_1 = \ln \lambda + (1 - D) \cdot \ln \delta_1,$$

$$\ln \lambda = \ln L_1 - (1 - D) \cdot \ln \delta_1.$$

Отсюда

$$\lambda = \frac{L_1}{\delta_1^{1-D}}$$

Растворы циркуля от  $\delta_2$  до  $\delta_1$  определяют соответствующие длины волн  $\delta = 1 / \omega$ , где  $\omega$  – частота. На графике (рис. 9) представлена спектральная плотность типичного профиля шероховатой поверхности.

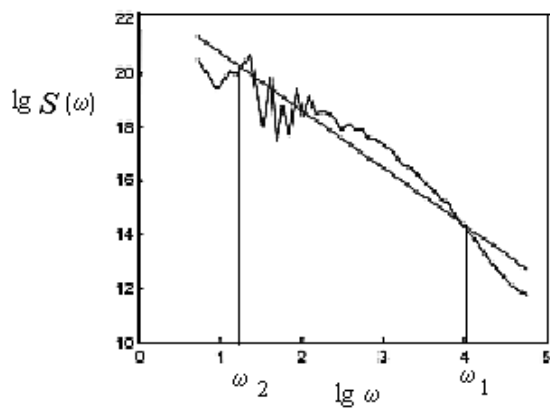


Рис. 9. Спектральная плотность

Спектральная плотность профиля фрактальной поверхности определяется

$$E_{eff} = E^* \varepsilon^{1/(2-D)},$$

На рис. 10 приведены зависимости эффективного модуля упругости от относительного сближения для стальных поверхностей при разных значениях фрак-

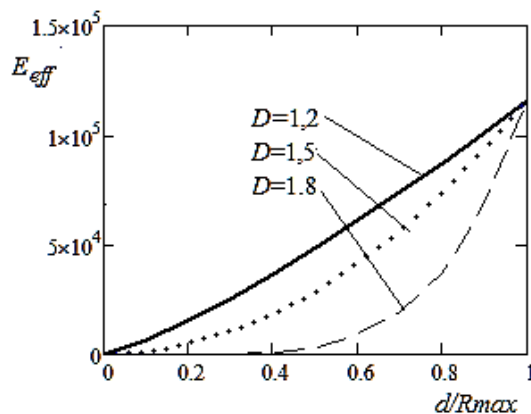


Рис. 10. Зависимости эффективного модуля упругости и отношения площадей по теории Герца от сближения при разной фрактальной размерности

зависимостью

$$S(\omega) = c\omega^{-\beta}$$

Здесь  $\beta$  – угловой коэффициент (наклон) прямой зависимости  $lg S(\omega)$  от  $lg(\omega)$ .

Фрактальная размерность оценивается выражением

$$D = \frac{5 - \beta}{2}$$

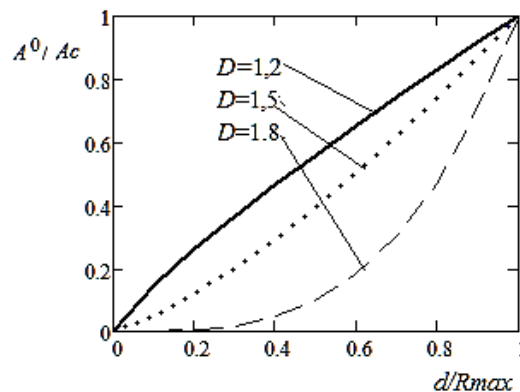
где  $\beta$  – модуль углового коэффициента.

**8. Фрактальные параметры поверхности.** В основе статистических моделей случайного поля лежит теория Лонге-Хиггинса [4] применительно к поверхности океана. Позже Найак [5] указал на возможность применения этой теории для описания шероховатой поверхности.

Полагаем, что шероховатый слой, имеющий высоту  $Rmax$  и соответствующее распределение материала, можно представить в виде фрактального объекта. К основным параметрам отнесем фрактальную размерность профиля как фрактальной кривой  $D$  и переменный модуль упругости самого слоя. Таким образом, шероховатый слой заменим покрытием толщиной  $Rmax$  с модулем упругости, зависящим от уровня сближения. Тогда запишем:

$$1 < D < 2. \quad \varepsilon = \frac{d}{Rmax}$$

тальной размерности (слева) и отношения площадей по теории Герца к контурным площадям с учетом фрактальной размерности (справа).



При  $d = Rmax$  эффективный модуль

упругости становится равным приведен-

ному модулю  $E^*$ . Применение эффективного модуля упругости, характеризующего структурные особенности шероховатого слоя, позволяет найти контурную площадь контакта гладкой жесткой сферы с шероховатым полупространством.

Таким образом, предлагаемый подход обосновывает экспериментальные данные, показывающие увеличение площади контакта по сравнению с данными теории Герца.

Для анализа зависимостей, представ-

ленных на рис. 11, необходимо выделить структурные особенности фрактальных кривых, которыми являются профили инженерных поверхностей. При  $D \rightarrow 1$  отношение  $A^0/A_c$  также стремится к единице. Более сложная структура фрактальной кривой при  $D \rightarrow 2$  приводит к росту контурной площади. Например, при величине относительного сближения  $d/R_{max} = 0,5$  имеем следующие расчетные данные:

$D$	1,2	1,5	1,8
$A^0/A_c$	0,561	0,397	0,099

**9. Сравнение с другими решениями.** Эффективный модуль является параметром, зависящим от относительного сближения. Это обстоятельство усложняет решение задачи контактного взаимодействия и требует применения численных методов и итерационных процедур. При таком подходе шероховатый слой представляется в виде покрытия толщиной, сравнимой с высотными параметрами шероховатости, с переменным модулем упругости. Решение поставленной задачи проводилось в два взаимосвязанных этапа. На первом этапе определялась контурная площадь, а на втором – фактическая площадь контакта.

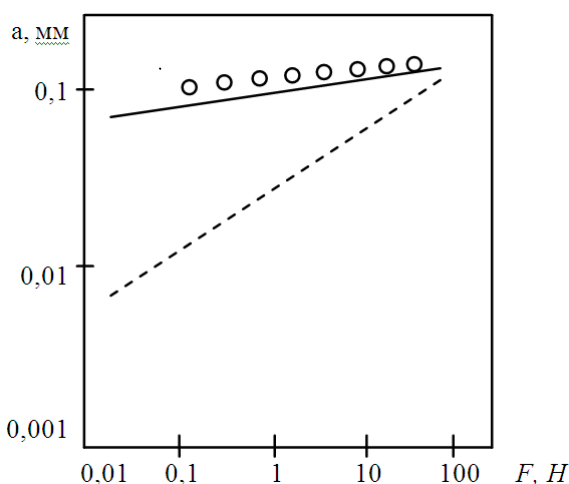


Рис. 11. Зависимость радиуса контурной площади контакта шара с шероховатой поверхностью от нагрузки: пунктирная линия – решение Г. Герца; сплошная линия – расчет по уравнению; кружки – экспериментальные данные [8]

**Оценка контурной площади.** Используем результаты, полученные Е. Финкиным [8] на основании аналитического решения задачи о контакте шара с полупространством при наличии тонкого упругого покрытия. Здесь шероховатый слой рассматривается как упругое покрытие толщиной  $R_{max}$ . Введение высоты выступа  $R_p$  в качестве толщины покрытия является оправданным при малых нагрузках. Тогда зависимость между нагрузкой  $F$  и радиусом  $a$  имеет вид

$$F = \frac{\pi E^* (1 - \mu) a^{\frac{4(D-2)-2}{D-2}}}{4(1 - 2\mu)(1 + \mu)(R_{max}/2)^{(D-3)/(D-2)}$$

Здесь  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $R$  – радиус шара.

Численное решение приведенного выражения позволяет получить зависимость радиуса контурной площадки от нагрузки (рис. 11). В качестве исходных данных для расчета были приняты:  $R = 3,18$  мм (радиус стального шара),  $D = 1,85$ ;  $E^* = 10^5$  МПа;  $\mu = 0,35$  (эти данные относятся к шероховатой поверхности плоского медного образца).

**Оценка фактической площади контакта.** Рассматривается упругий контакт, когда все неровности находятся в упругом состоянии. Подобное состояние справедливо для слабонагруженных контактов. Рассмотренная ранее методика определения контурной площади контакта основывалась на представлении шероховатого слоя как сплошного покрытия с переменным модулем упругости. Реально при

малых нагрузках контакт дискретен и состоит из отдельных пятен фактического контакта.

В соответствии с моделью А. Маджумдара [6] используем размерное распределение пятен фактического контакта, записанное в виде

$$n(s) = \frac{dN(S > s)}{ds} = \frac{D S_{max}^{D/2}}{2 s^{(D/2)+1}}$$

Здесь  $N(S > s) = \left(\frac{S_{max}}{s}\right)^{\frac{D}{2}}$  – формула

Корчака, характеризующая распределение по размерам исследуемых объектов и оценивающая число объектов, превышающих минимальный размер  $S$ ;  $S_{max}$  – максимальный размер пятна контакта.

Фактическая площадь зависит от

### Выводы

1. На основе фрактальных представлений предложена модель шероховатого слоя в виде сплошного покрытия, толщина которого принята равной максимальной высоте неровностей, а модуль упругости зависит от фрактальной размерности и степени деформации покрытия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайтхауз, Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы: [пер. с англ.] / Д. Уайтхауз. - М.: Интеллект, 2009. - 472 с.
2. Карташов, А.И. Шероховатость поверхности и методы ее измерения / А.И. Карташов. - М.: Изд-во стандартов, 1967. - 160 с.
3. Stout, K.J. Development of methods for the characterization of roughness three dimensions / K.J. Stout. - Penton Press, 2000. - 358 p.
4. Lonquet-Higgins, M. Statistical properties of an isotropic random surface / M. Lonquet-Higgins // Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A. - London, 1957. - Vol. 250. - P. 157-174.
5. Найак, П. Применение модели случайного поля

1. Whitehouse, D. *Surface Metrology. Principles, Industrial Methods and Devices*: [transl. from Engl.] / D. Whitehouse. - M.: Intellect, 2009. - pp. 472.
2. Kartashov, A.I. *Surface Roughness and Methods of Its Measurement* / A.I. Kartashov. - M.: Standards Publishing House, 1967. - pp. 160.
3. Stout, K.J. Development of methods for the characterization of roughness three dimensions / K.J. Stout. - Penton Press, 2000. - 358 p.

структуры шероховатого слоя фрактально-го объекта с размерностью  $1 < D < 2$  и определяется зависимостью

$$Ar = \int_0^{S_{max}} n(s) s ds = \frac{D}{2-D} S_{max}$$

Предложенный подход к оценке фактической площади контакта позволяет найти момент трения сферического подшипника скольжения как

$$T_f = \tau A_r R_1$$

Здесь  $\tau$  – удельное сопротивление сдвигу фрикционных связей;  $A_r$  – фактическая площадь контакта;  $R_1$  – радиус внутренней сферы.

2. Приведены зависимости отношения контурной площади касания к площади контакта, рассчитанной по формуле Герца.

3. Произведена оценка контурной и фактической площадей контакта сферы с шероховатой поверхностью.

- для исследования шероховатых поверхностей / П. Найак // Проблемы трения и смазки. - 1971. - № 3. - С. 85-95.
6. Маджумдар, А. Фрактальная модель упругопластического контакта шероховатых поверхностей / А. Маджумдар, Б. Бхушан // Современное машиностроение. Сер. Б. - 1991. - № 6. - С. 11-23.
7. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. - М.: Ин-т компьютер. иссл., 2002. - 636 с.
8. Финкин, Е. Уравнение износа твердых смазочных пленок для оценки их износной долговечности / Е. Финкин // Проблемы трения и смазки. - 1970. - № 2. - С. 104-110.

4. Lonquet-Higgins, M. Statistical properties of an isotropic random surface / M. Lonquet-Higgins // Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A. - London, 1957. - Vol. 250. - P. 157-174.
5. Niake, P. Application of random field model for investigation of rough surfaces / P. Niake // *Problems of Friction and Lubrication*. - 1971. - № 3. - pp. 85-95.
6. Majumdar, A. Fractal model of elasto-plastic con-



tact of rough surfaces / A. Majumdar, B. Bhushan // *Modern Mechanical Engineering*. Series. B. - 1991. - № 6. - pp.11-23.

7. Mandelbrot, B. *Nature Fractal Geometry* / B. Mandelbrot. - M.: Institute of Computer Investigations,

2002. – pp. 636.

8. Finkin, E. Equation of solid lubricating films wear for estimation of their wear life / E. Finkin // *Problems of Friction and Lubrication*. - 1970. - № 2. - pp. 104-110.

*Статья поступила в редколлегию 3.04.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Памфилов Е.А.*

#### Сведения об авторах:

**Тихомиров Виктор Петрович**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Детали машин» Брянского государственного технического университета, тел. 8 (4832) 58-82-12, e-mail: [dm-bgtu@yandex.ru](mailto:dm-bgtu@yandex.ru).

**Горленко Александр Олегович**, д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, тел. 8 (4832) 58-82-79, e-mail: [trt@tu-bryansk.ru](mailto:trt@tu-bryansk.ru).

**Измеров Михаил Александрович**, к.т.н., доцент

**Tikhomirov Victor Petrovich**, D. Eng., Prof., Head of the Dep. “Machinery”, Bryansk State Technical University, Phone: 8 (4832) 58-82-12, e-mail: [dm-bgtu@yandex.ru](mailto:dm-bgtu@yandex.ru).

**Gorlenko Alexander Olegovich**, D. Eng., Prof. of the Dep. “Motor Transport”, Bryansk State Technical University, Phone: 8 (4832) 58-82-79, e-mail: [trt@tu-bryansk.ru](mailto:trt@tu-bryansk.ru).

кафедры «Детали машин» Брянского государственного технического университета, тел. 8 (4832) 58-82-12, 8-952-960-17-19, e-mail:

[m.izmerov@yandex.ru](mailto:m.izmerov@yandex.ru).

**Ерохин Александр Николаевич**, аспирант кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, e-mail: [aleksanerokhin@yandex.ru](mailto:aleksanerokhin@yandex.ru).

**Izmerov Mikhail Alexandrovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Machinery”, Bryansk State Technical University, Phone: 8 (4832) 58-82-12, 8-952-960-17-19, e-mail: [m.izmerov@yandex.ru](mailto:m.izmerov@yandex.ru).

**Yerokhin Alexander Nikolayevich**, Post graduate student of the Dep. “Motor Transport”, Bryansk State Technical University, e-mail: [aleksanerokhin@yandex.ru](mailto:aleksanerokhin@yandex.ru).

## Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 658.562.47

DOI: 10.12737/article\_59b11cc0ad5a99.25634301

П.А. Акулов, Д.И. Петрешин

### АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ СОЧЛЕНЕНИЯ И РАСЧЛЕНЕНИЯ ЕДИНИЧНОГО КОНТАКТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОЕДИНИТЕЛЯ

Предложена автоматизированная измерительная установка для повышения производительности процесса сборки и испытания электрических соединителей и исключения человеческого фактора при испытаниях. Обоснована структура автоматизированной установки. Проанализированы результаты работы установки при измерении силы сочле-

нения и расчленения единичного контакта электрического соединителя.

**Ключевые слова:** измерение силы, сочленение контакта, расчленение контакта, автоматизированная измерительная установка, единичный контакт.

P.A. Akulov, D.I. Petreshin

### AUTOMATED PLANT FOR MEASUREMENT OF JOINT AND DISJOINT FORCE OF ELECTRIC CONNECTOR SINGLE CONTACT

At present in industry the whole process of assembling and tests of electric connectors is carried out manually. Such processes, on the one hand, lead to rise in price of products caused by inefficient use of manpower reserves, and on the other hand, do not exclude a moment of a so-called human factor. The purpose of this work is an increase of productivity and accuracy of the measurement of joint and disjoint forces of contacts in electric connectors at the expense of measurement process automation. We have an electric connector in which it is necessary to determine a joint and disjoint force of the contact by means of the input reply part (pin) of the connector with the fixation of measurement results, storage and retention for the further analysis. In the structure of the automated plant for the joint and disjoint force measurement of electric connector con-

tacts there are following units: a measurement units, a unit for symbolic information mapping, a unit for drive control of the measurement plant. The measurement time of a joint and disjoint force for one contact makes 1.5 – 2s, joint-disjoint rate – 10 mm/s.

The developed automated plant for the measurement of a joint and disjoint force of the electric connector single contact and realized as a prototype has shown its working capacity. An error in the definition of a joint and disjoint force of an electric connector single contact made  $\pm 0.01$  N. The data obtained are new and of a certain interest at the production quality assessment of electric connector contacts.

**Key words:** force measurement, contact joint, contact disjoint, automated measuring apparatus, single contact.

#### Введение

Практически во всех современных электрических устройствах есть электрический соединитель (рис. 1). Электрический соединитель – электротехническое устройство, предназначенное для механического соединения и разъединения элект-

рических цепей, состоящее из двух или более частей (вилки, розетки), образующих разъемное контактное соединение. Данная продукция в процессе производства проходит несколько тестирований, в том числе и измерение силы сочленения и расчленения контактов.

В настоящий момент на производстве весь процесс сборки и испытания электрических соединителей проходит вручную (рис. 2). На ряде этапов сборки и испыта-



Рис. 1. Электрический соединитель

рических цепей, состоящее из двух или более частей (вилки, розетки), образующих



Рис. 2. Ручной процесс контроля силы расчленения контакта

ний используются ручные приспособления и механизмы. Такие процессы, с одной стороны, ведут к удорожанию готовой продукции в результате неэффективного использования трудовых резервов, а с другой - не исключают момент так называемого человеческого фактора. С какой бы тщательностью ни выполнялись сборка и испытание электрических соединителей, полностью исключить ошибки человека не представляется возможным. Более того, брак продукции, возникший в результате

### Цель работы

Целью работы является повышение производительности и точности измерения силы сочленения и расчленения контактов

### Постановка задачи

Пусть имеем электрический соединитель, у которого необходимо определить силу сочленения и расчленения единичного контакта путем ввода ответной части (штыря) соединителя с фиксацией резуль-

### Решение задачи

Для определения силы сочленения и расчленения контакта путем ввода ответной части соединителя необходима измерительная установка, оснащенная датчиком измерения силы с закрепленной на нем ответной штырьковой частью разъема. Для обеспечения универсальности измерительной установки ответная часть может быть съемной - для возможности одной установкой осуществлять измерения различных типов электрических соедините-

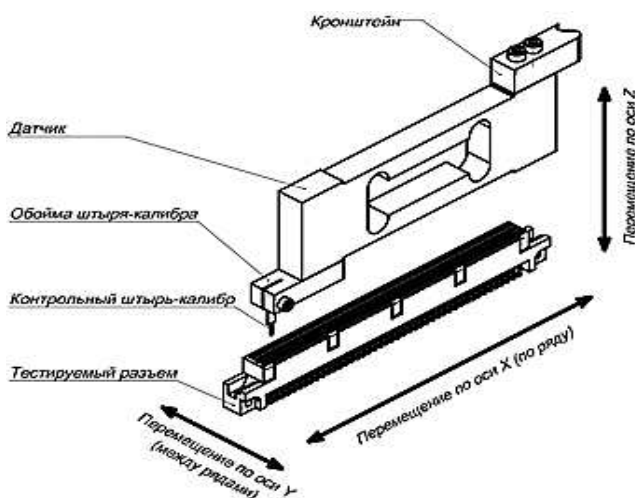


Рис. 3. Схема измерительной установки. В таком случае можно представить

сборки и изготовления элементов разъемов, не всегда выявляется в результате испытания. Само испытание электрического соединителя на определение силы сочленения и расчленения его контакта выполняется с использованием модифицированной гирьки и ответной части разъема (рис. 2), что дает весьма субъективные результаты. Фактически в настоящее время каких-либо реальных данных испытаний электрических соединителей нет.

электрических соединителей за счет автоматизации процесса измерения.

татов измерений. При проведении испытаний электрического соединителя необходимо результаты испытаний запоминать и сохранять для последующего анализа.

измерительную установку в виде «швейной машинки», где в качестве «иголки» выступает ответная штырьковая часть разъема с датчиком силы. Перемещение датчика силы осуществляется трехкоординатной измерительной установкой. Схематично предлагаемая измерительная установка представлена на рис. 3.

Перемещение по оси X обеспечивает переход от одного контакта к другому в ряду, перемещение по оси Y - переход между рядами, а перемещение по оси Z - проведение измерений силы сочленения и расчленения контакта с ответной штырьковой частью разъема, соединенной с датчиком силы.

По сигналу с датчика силы блок управления измерительной установки принимает решение о продолжении процесса измерения или его остановке - в том случае, если фиксируется перегрузка (попадание посторонних предметов, остатков материала корпуса, деформация контакта в разъеме при его некачественной сборке).

Для позиционирования испытуемого электрического соединителя предполагается ввести в состав измерительной уста-

новки сменное посадочное место, которое зафиксирует испытуемый соединитель данного типа в определенном положении. Это позволит приводам установки передвинуть испытуемый электрический соединитель из позиции загрузки-выгрузки к месту проведения измерений, а после проведения измерений обеспечит возврат соединителя в положение загрузки-выгрузки.

С целью исключения ошибок человеческого фактора предполагается ввести специальную электронную идентификацию сменного посадочного места для установки испытуемого электрического соединителя и измерительной головки, с тем чтобы блок управления еще до начала измерений самостоятельно считал эти идентификационные данные и сопоставил их с требуемыми.

Если текущие идентификационные данные сменного посадочного места для установки электрического соединителя совпадают с модификаций установленного датчика силы, то блок управления принимает решение о проведении дальнейших измерений с автоматической установкой требуемых параметров перемещения по координатам и допустимом диапазоне измеряемых сил.

Таким образом, оказывается невозможным один алгоритм измерений при установке посадочного места другого типа, проведение измерений при установке датчиков сил, не соответствующих установленному типу разъема.

Безусловно, все вышеперечисленное не отменяет пошагового контроля сил во избежание поломки измерительной головки бракованными разъемами или при попадании в зону проведения измерений инородных предметов. Блок управления измерительной установки оставляет возможность изменения параметров измерений только квалифицированному персоналу.

Блок управления измерительной установки должен:

- обеспечивать питание и обработку сигналов установленного датчика усилия;
- обеспечивать формирование сигналов управления тремя шаговыми двигателями для перемещения разъема относительно измерительной головки по 3 координатам с постоянным контролем усилия при перемещении по вертикальной оси;
- позволять для выбранного типа тестируемого разъема хранить характеристики движения измерительной головки при перемещении от контакта к контакту, число проверяемых контактов, рядов контактов и характеристики допустимого диапазона усилий;
- отображать на модуле индикации результаты проведенных измерений, текущие параметры хода измерений и, если необходимо, контакты, не прошедшие проверку;
- в случае необходимости выводить протокол испытаний с указанием даты/времени проведения измерений, результатов проведенных измерений по каждому из контактов.

Во избежание ошибок при введении параметров предполагается, что все требуемые параметры хранятся в энергонезависимой памяти, а модуль управления после установки посадочной площадки для данного типа разъема самостоятельно устанавливает требуемые параметры (предварительно установленные квалифицированным персоналом) и проверяет соответствие установленного типа датчика усилия тому типу, который необходим для проведения измерений.

Блок-схема предлагаемой автоматизированной установки измерения силы сочленения и расчленения контакта электрического соединителя представлена на рис. 4.

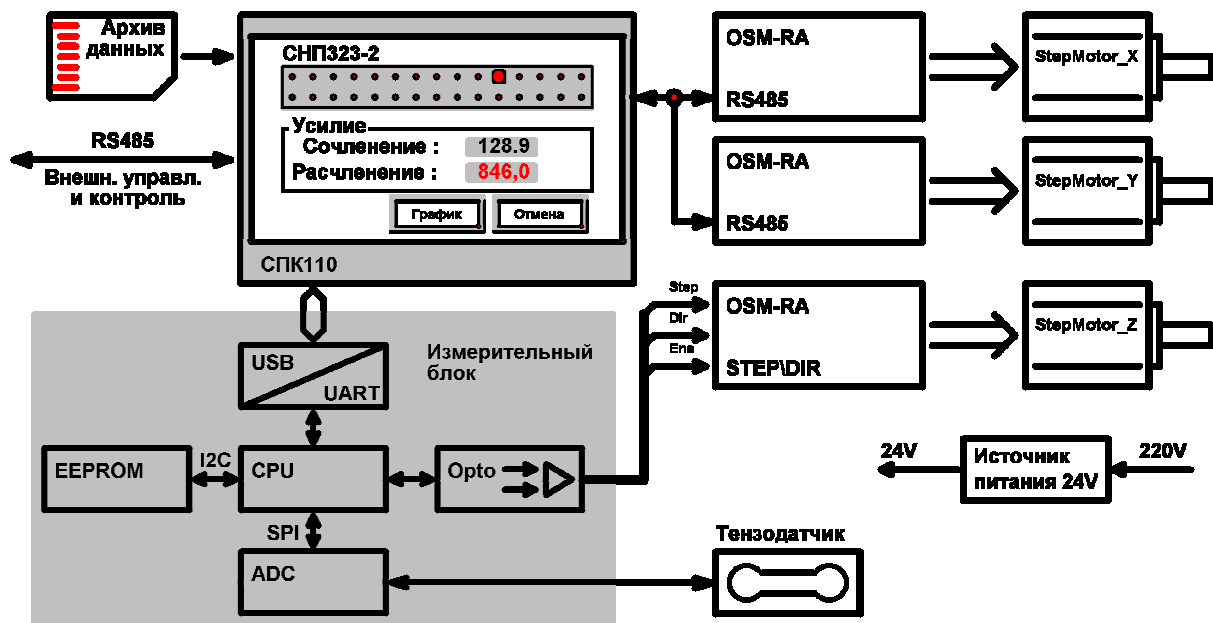


Рис. 4. Блок-схема автоматизированной измерительной установки

В состав автоматизированной установки измерения силы сочленения и расчленения контакта электрического соединителя входят следующие блоки:

- измерительный блок;
- блок отображения символьной информации;
- блок управления приводами измерительной установки.

Измерительный блок обеспечивает:

- прием информации с датчика силы - тензодатчика;
- обработку и анализ измерительной информации;
- управление приводом перемещения датчика силы;
- сохранение результата измерения;
- обмен информацией с блоком отображения символьной информации.

Блок отображения символьной информации представляет собой устройство класса «человеко-машинный интерфейс» со встроенными функциями свободно программируемого контроллера [1]. Блок отображения символьной информации осуществляет:

- управление координатными перемещениями измерительной установки в ручном и автоматическом режимах;
- выбор режима работы автоматизированной измерительной установки;
- настройку режима работы;
- отображение информации;
- архивирование данных.

Блок управления приводами измерительной установки осуществляет управление шаговыми двигателями для реализации координатных перемещений в установке. В автоматизированной измерительной установке используются три управляемые координаты. Блок управления приводами реализует несколько режимов работы. Это позволяет использовать его для различных целей, начиная от применения в координатных станках с ЧПУ и заканчивая автономной работой в составе технологических линий. Устройство может управляться стандартными логическими сигналами «Шаг», «Направление» и «Разрешение», работать в автоматическом режиме, вращая двигатель со скоростью, заданной потенциометром, а также управляться в режиме реального времени по последовательному порту [2].

### Результаты исследований

Макетирование прототипа установки для измерения силы сочленения и расчленения единичного контакта на базе гравировального станка показывает, что ре-

ализация возможна. Измерение силы сочленения и расчленения испытуемого электрического соединителя с тестовым шты-

рем может проводиться с достаточно высокой скоростью в соответствии с [3].

На рис. 5 представлен прототип установки измерения силы сочленения и



Рис. 5. Прототип измерительной установки

расчленения единичного контакта, а на рис. 6 - процесс измерения силы сочленения и расчленения единичного контакта электрического соединителя с использованием датчика силы с закрепленной на нем ответной штырьковой частью разъема.

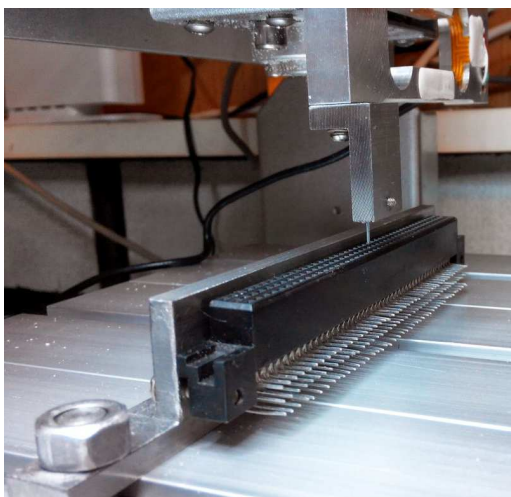


Рис. 6. Процесс измерения силы сочленения и расчленения единичного контакта

Данные, получаемые со схемы измерения, обрабатывались внешним ком-

пьютером. Данные записываются в текстовый файл, после чего импортируются в MS Excel для построения графиков. На рис. 7 представлены результаты измерения сил, фиксируемые датчиком, в процессе вхождения штыря в измеряемый контакт и в процессе выведения штыря из испытуемого контакта. Измерения проведены для нескольких последовательно расположенных контактов в одном ряду разъема. На рис. 7 по оси ординат откладывается сила сочленения и расчленения контакта, а по оси абсцисс - порядковый номер точки измерения. Время измерения силы сочленения и расчленения для одного контакта составляет 1,5 - 2 с, скорость сочленения-расчленения - 10 мм/с [4].

Анализ полученных результатов измерения силы сочленения и расчленения единичного контакта (рис. 7) показывает, что сочленение штырьковой части разъема с единичным контактом происходит на участке В от точки С до точки А. На этом участке сила сочленения резко возрастает и достигает своего максимума в точке А, происходит проникновение единичного штырька в контакт. Сила сочленения представляет собой сумму силы от действия упругих элементов контакта на единичный штырек  $F_y$  и силы трения  $F_{тр}$  штырька об упругие элементы контакта:

$$F_c = F_y + F_{тр}$$

На участке А-Б единичный штырек перемещается внутри контакта и испытывает действие силы трения  $F_{тр}$ . Глубина проникновения штыря в контакт задается в измерительном блоке и зависит от типа электрического соединителя. Глубина проникновения штыря в контакт в процессе испытания контролируется измерительным блоком.

На участке Г (от точки Б до точки Д) происходит расчленение штырька и контакта. На этом этапе на штырь также действует сумма силы со стороны упругих элементов контакта и силы трения штырька и упругих элементов контакта.

## Выводы

Разработанная автоматизированная установка измерения силы сочленения и расчленения единичного контакта электрического соединителя, впервые реализованная в виде прототипа, показала свою работоспособность. Погрешность определения силы сочленения и расчленения

единичного контакта электрического соединителя составила  $\pm 0,01$  Н. Полученные данные (рис. 7) являются новыми и представляют определенный интерес при оценке качества изготовления контактов электрических соединителей.

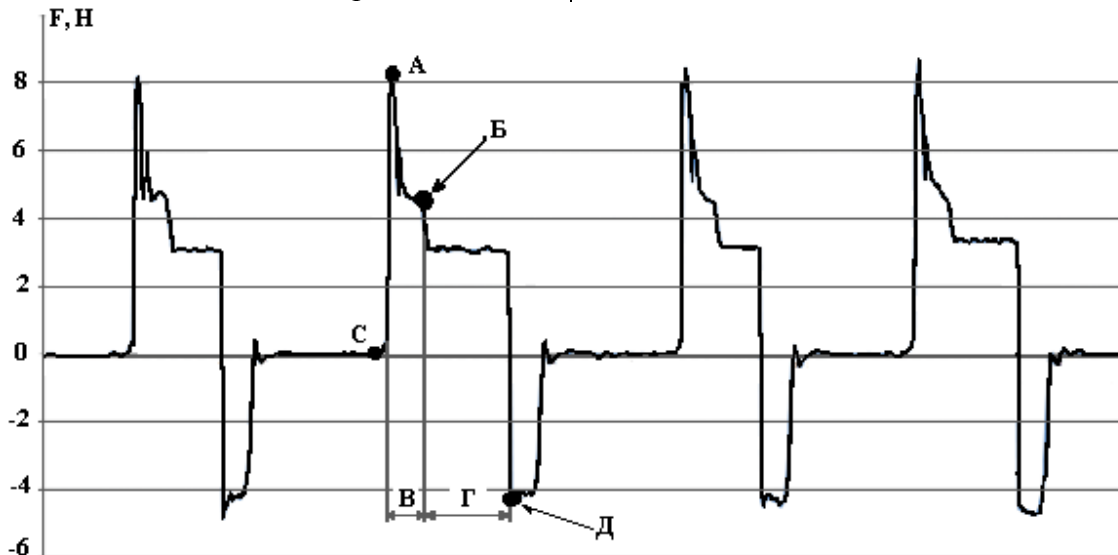


Рис. 7. Результаты измерения силы сочленения и расчленения единичного контакта

## Заключение

В дальнейшем исследования будут продолжены и направлены на совершенствование разработанного прототипа автома-

тизированной установки измерения силы сочленения и расчленения контакта электрического соединителя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СПК1xx. Панель оператора программируемая (панельный контроллер). Руководство по эксплуатации / ОВЕН. - URL: [http://www.owen.ru/uploads/re\\_spc1xx\\_1760.pdf](http://www.owen.ru/uploads/re_spc1xx_1760.pdf) (дата обращения: 16.05.2017).
- Контроллер шагового двигателя OSM -17RA/ OSM -42RA. Прошивка OSM MB. Полное описание и руководство по эксплуатации. Версия 25-0413 / ООО «Онитекс». - СПб., 2013. - URL: [http://onitex.ru/files/Documentation/OSM/datasheet\\_OSM17RA\\_OSM42RA.pdf](http://onitex.ru/files/Documentation/OSM/datasheet_OSM17RA_OSM42RA.pdf) (дата обращения: 16.05.2017).
- ГОСТ Р 51325.2.2-99. Соединители электрические бытового и аналогичного назначения. Ч. 2-2. Дополнительные требования к вилкам и розеткам для взаимного соединения в приборах и методы испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 2000. - 31 с.
- ГОСТ 23784-98. Соединители низкочастотные низковольтные и комбинированные. Общие технические условия. - Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2004.
- SPK1xx. Operator's Panel Programmable (panel controller). User Manual / OVEN. - URL: [http://www.owen.ru/uploads/re\\_spc1xx\\_1760.pdf](http://www.owen.ru/uploads/re_spc1xx_1760.pdf) (address date: 16.05.2017).
- Controller of Stepper Motor OSM -17RA/ OSM -42RA. Broaching OSM MB. Complete description and user manual. Version 25-0413 / PC "Onitex". - S-Pb., 2013. - URL: [http://onitex.ru/files/Documentation/OSM/datasheet\\_OSM17RA\\_OSM42RA.pdf](http://onitex.ru/files/Documentation/OSM/datasheet_OSM17RA_OSM42RA.pdf) (address date: 16.05.2017).
- SRS the RF 51325.2.2-99. Electric Connectors of Domestic and Similar Use. Part. 2-2. Additional Requirements to Plugs and Sockets for Mutual Joint in Devices and Test Methods. - M.: Standards Publishing House, 2000. - pp. 31.
- SRS 23784-98. Low-frequency Low-voltage and Combined Connectors. General Technical Conditions. - Minsk: Inter-State Council on Standardization, Metrology, and Certification, 2004.

*Статья поступила в редколлегию 12.05.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского  
государственного технического университета  
Киричек А.В.*

**Сведения об авторах:**

**Акулов Павел Александрович**, аспирант Брянского государственного технического университета, e-mail: [akulov.paul@mail.ru](mailto:akulov.paul@mail.ru).

**Akulov Paul Alexandrovich**, Post graduate student, Bryansk State Technical University, e-mail: [akulov.paul@mail.ru](mailto:akulov.paul@mail.ru).

**Петрешин Дмитрий Иванович**, д.т.н., директор учебно-научного технологического института Брянского государственного технического университета, e-mail: [dipetreshin@yandex.ru](mailto:dipetreshin@yandex.ru).

**Petreshin Dmitry Ivanovich**, D. Eng., Director of Educational-Scientific Technological Institute of Bryansk State Technical University, e-mail: [dipetreshin@yandex.ru](mailto:dipetreshin@yandex.ru).



**Металлургия и материаловедение**

УДК 621.789

DOI: 10.12737/article\_59b11cbbc6c3d3.56536637

А.Ф. Балаев

**ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ  
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН  
НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Представлена технология релаксации остаточных напряжений и стабилизации геометрических параметров упругих пластин под действием ультразвуковых колебаний. Описана математическая модель для расчета остаточной деформации и остаточных напряжений. На основе математической модели получены результаты компьютерного

моделирования в виде графиков зависимостей остаточной деформации и остаточных напряжений от длительности обработки и амплитуды ультразвуковых колебаний.

**Ключевые слова:** ультразвуковая релаксация, деформация, остаточные напряжения, компьютерное моделирование, пластина.

A.F. Balaev

**SUPERSONIC RELAXATION INVESTIGATION  
OF METAL PLATE RESIDUAL STRESSES BASED ON CAD**

For the stabilization of elastic plate geometric parameters in the production there is used a method of "training" having low productivity as an alternative to which a method of supersonic stabilization is developed. The essence of a supersonic stabilization consists in the creation of elastic deformation applied by a static load in the central area of the plate and in imparting a tool supersonic oscillations which results in the relaxation of residual stresses and the stabilization of plate geometrical parameters. For the technological parameters computation of a supersonic treatment there are obtained analytical expressions. The computer simulation carried out on the basis of computation-analytical models allowed revealing and presenting vividly the dependences of residual stresses and a plate deforma-

tion upon duration and amplitude of ultrasonic oscillations. On the basis of the dependences obtained it is defined that for the value decrease of a residual deformation the amplitude of oscillations should be decreased, but at the same time the processing period increases. At that, the larger the amplitude of oscillations, the more intensive the decrease of residual stresses occurs. The intensive change of a residual deformation and stresses during the initial some seconds characterizes a high productivity of an ultrasonic stabilization recommended as a substitution of the "training" technology.

**Key words:** supersonic relaxation, deformation, residual stresses, CAD, plate.

**Введение**

Измерение перепада давления топлива и масла в топливном и масляном фильтрах самолетов и вертолетов осуществляется датчиками перепада давления, от которых зависит надежность авиационной техники и безопасность полетов. В основе измерения давления в тензометрических датчиках перепада давления лежит изменение подаваемого электрического сигнала, пропорционального перепаду давления. Это происходит в результате изменения сопротивления резисторов, которые размещены на упругом чувствительном элементе в виде круглой пластины. Под действием рабочего давления жидкости или газа упру-

гая пластина деформируется, что приводит к растяжению резисторов и изменению их электрического сопротивления. Для того чтобы регистрируемое давление соответствовало фактическому, геометрические и физико-механические параметры упругой пластины не должны меняться со временем.

Одной из главных причин изменения жесткости пластины по мере эксплуатации датчика являются остаточные напряжения, которые накопились в процессе изготовления пластины. Многократное деформирование, которому подвергается пластина в ходе эксплуатации датчика под рабочим

давлением, приводит к релаксации остаточных напряжений и возникновению остаточной деформации вследствие пластической ползучести материала.

Для стабилизации жесткости пластины при её изготовлении на завершающем этапе технологического процесса предусмотрена операция «тренировки». Эта операция заключается в многократном циклическом нагружении пластины равномерно распределенной нагрузкой, создаваемой давлением жидкости или газа. Осуществляемая таким образом в ускоренном режиме на протяжении нескольких часов при отрицательных и повышенных температурах имитация условий эксплуатации датчика приводит к ускорению релаксации остаточных напряжений. Очевидным недостатком данного технологического способа является низкая производительность и соответственно повышенное энергопотребление.

Устранить данные недостатки можно применением технологии стабилизации на

основе использования энергии ультразвуковых колебаний. Высокая частота ультразвуковых колебаний позволит существенно сократить продолжительность операции за счет малого периода цикла нагружения. Проведенные исследования [1; 2] подтверждают высокую производительность и стабильность результатов при использовании ультразвуковых колебаний для релаксации остаточных напряжений. Сравнительный анализ применения тепловой энергии и энергии ультразвуковых колебаний [3] показал, что применение ультразвуковых колебаний позволяет добиться повышения производительности, в несколько десятков раз большего в сравнении с применением тепловой энергии.

На основании приведенных аргументов в пользу применения ультразвуковых колебаний для стабилизации геометрических параметров и релаксации остаточных напряжений упругих пластин был разработан технологический способ [4] и выполнено математическое моделирование.

### Способ ультразвуковой стабилизации упругих пластин

Ультразвуковая стабилизация геометрических параметров упругих круглых

пластин осуществлялась по схеме, представленной на рис. 1.

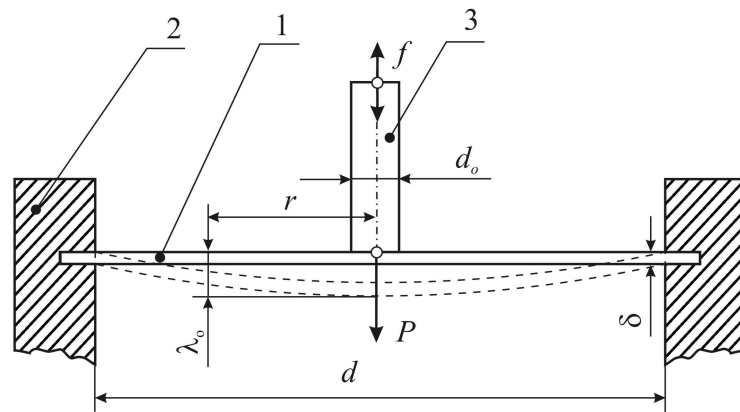


Рис. 1. Схема ультразвуковой стабилизации круглых пластин:

- 1 – круглая пластина; 2 – корпус датчика;  
3 – инструмент с ультразвуковыми колебаниями

К центральной части упругой круглой пластины 1 толщиной  $\delta$  и диаметром  $d$ , жестко заземленной по контуру в корпусе 2 датчика перепада давления, прикладывается инструмент 3 в виде стержня. К инструменту 3 диаметром  $d_0$ , установленному нормально к поверхности круглой пластины 1, прикладывается статическая

нагрузка  $P$ , вызывающая упругую деформацию пластины, что исключает потерю исходной геометрической формы. Затем инструменту под нагрузкой  $P$  сообщаются ультразвуковые колебания частотой 18...22 кГц.

Отличием способа ультразвуковой стабилизации, изображенного на рис. 1, от

способа «тренировки» является то, что сила воздействия на пластину не распределена по ее поверхности, а сосредоточена в центре пластины на небольшой круговой площадке диаметром  $d_0$ , а частота колеба-

### Расчетно-аналитическая модель

Для исследования механизма релаксации остаточных напряжений упругой пластины было выполнено математическое моделирование.

При разработке математической модели процесса упругой деформации пластины с учетом явления гистерезиса приняты следующие допущения:

1. Соотношение между толщиной пластины и ее размерами в плане:

$$\delta < \frac{1}{3}(a - b),$$

где  $\delta$  – толщина пластины, мм;  $a$  и  $b$  – радиусы внешней и внутренней контурных окружностей пластины, мм.

2. Максимальный прогиб пластины

$$\lambda \leq \frac{1}{5}.$$

3. Напряжения в пластине не превышают предела упругости ее материала.

4. Пластина жестко закреплена по периметру, а внешняя нагрузка распределена по площади окружности, находящейся в центре пластины, так что распределенные по поверхности пластины напряжения

$$q = \frac{4P}{\pi \cdot d^2},$$

где  $d$  – диаметр пластины, м;  $P$  – внешняя нагрузка, Н;  $q$  – равномерно распределенные по поверхности пластины напряжения, Н/м<sup>2</sup>.

5. Потери энергии при деформации пластины прямо пропорциональны потенциальной энергии деформации пластины, обусловленной наличием в материале пластины внутренних дефектов в виде межзеренных и межфазных пластических сдвигов и движения дислокаций в процессе изготовления, и обратно пропорциональны энергии насыщения материала пластины, при которой пластическая деформация по границам зерен охватывает весь объем материала. Это положение вытекает из прин-

ний пластины соответствует частоте колебаний ультразвукового генератора  $f$ . Поэтому за время  $t$  произойдет  $i = ft$  циклов нагружения пластины.

ципа самоорганизации термодинамической системы, которая заключается в том, что система образует структуру, то есть «определенным образом располагает свои энергоснабженные элементы, чтобы при минимуме запасенной энергии уравновесить внешние возмущения» [5].

Поскольку основная задача математического моделирования технологического процесса состоит в получении выражений для расчета технологических параметров обработки и априорной оценки результата по контролируемым параметрам, то в данной работе приведены выражения в конечном виде.

Величина допустимой силы нагружения пластины выбирается исходя из условия

$$P < \frac{\pi \cdot \delta \cdot \sigma_t}{(1 + \mu) \cdot \left( \frac{d_o^2}{d^2} - 4 \ln \left( \frac{d_o}{d} \right) \right)}.$$

Если использовать силу воздействия на пластину выше расчетной, то это может привести к пластической деформации пластины и выходу ее из строя.

Сила воздействия на пластину складывается из двух составляющих:

$$P = P_o + P_a,$$

где  $P_o$  – статическая нагрузка на пластину, Н;  $P_a$  – амплитудная величина динамической нагрузки ультразвуковых колебаний.

Величина  $P_a$  находится из выражения

$$P_a = \frac{64\pi \cdot \eta \cdot \delta^3 \cdot A}{3 \cdot d^2 \left( 4 - 3 \frac{d_o^2}{d^2} + 4 \frac{d_o^2}{d^2} \ln \frac{d_o}{d} \right)}.$$

Тогда

$$P_o = k_z(P - P_a),$$

где  $k_z$  - коэффициент запаса,  $k_z = 0,6 - 0,7$ .

Энергия деформации пластины в прямом и обратном направлениях определяется как

$$W_v = k_p A \left( P_o - \frac{1}{2} P_a \right),$$

где  $k_p$  - коэффициент потери энергии при передаче ее от ультразвукового инструмента обрабатываемой круговой пластине.

Величина  $k_p$  определяется опытным путем и, согласно исследованиям, составляет  $0,1 \dots 0,5$ .

Исходная потенциальная энергия упругой деформации  $U_n$  круговой пластины и энергия насыщения ее материала  $U_p$  определяются соответственно следующими выражениями:

$$U_n = \frac{\tau_o^2}{G(1+\mu)} \pi \cdot \delta \cdot d^2,$$

$$U_p = \frac{\tau_t^2}{G(1+\mu)} \pi \cdot \delta \cdot d^2,$$

где  $\tau_t$  - напряжения пластического сдвига материала пластины.

Для оценки возможной остаточной деформации пластины при неограниченном времени обработки используется выражение

### Компьютерное моделирование

В качестве объекта исследования для компьютерного моделирования была выбрана круглая пластина, применяемая в качестве чувствительного элемента в датчиках контроля избыточного давления типа МД-ТП, производимая в ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева (г. Энгельс). Пластина диаметром  $d = 29$  мм и толщиной  $\delta = 0,5$  мм изготовлена из стали 20Х13 (ГОСТ 5632-72), закаленной до твердости 48-50 HRC. По результатам компьютерного моделирования получены графики зависимостей остаточной деформации (рис. 1) и остаточных напряжений (рис. 2) от продолжительности обработки и амплитуды ультразвуковых колебаний как наиболее важных технологических факторов, оказывающих влияние на требуемые показатели качества.

С позиции управления процессом

$$\Delta\lambda = A \frac{U_o \cdot W_n}{U_p^2} \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{W_n}{U_p}\right) \left(1 - \frac{W_v}{U_p}\right)}.$$

Потребное время обработки вычисляется с помощью следующего выражения:

$$t = \frac{\ln k_p}{\ln \left[ \left(1 - \frac{W_n}{U_p}\right) \left(1 - \frac{W_v}{U_p}\right) \right]},$$

где  $k_p$  - доля от предельно возможной остаточной деформации пластины  $\Delta\lambda$ , которая допустима по техническим условиям.

Обычно  $k_p$  выбирают в диапазоне  $0,05 \dots 0,1$ , стараясь не слишком занижать величину  $k_p$ , так как это может привести к длительному времени обработки и даже к разрушению материала круговой пластины.

Оценка остаточных напряжений в пластине после ультразвуковой обработки в течение времени  $t$  осуществляется с помощью выражения

$$\tau(t) = \tau_o \sqrt{\left(1 - \frac{W_n}{U_p}\right)^{f \cdot t} \left(1 - \frac{W_v}{U_p}\right)^{f \cdot t}} \quad (1)$$

ультразвуковой стабилизации интерес представляет зависимость величины остаточных напряжений от технологических факторов, представленная на рис. 2.

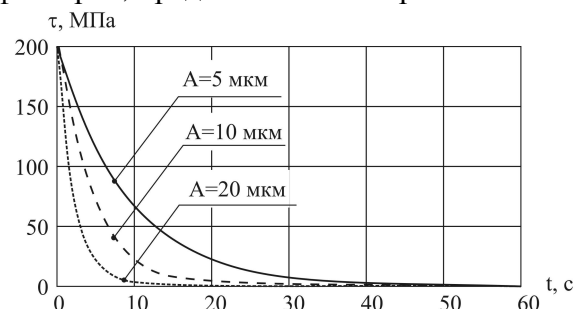


Рис. 2. Зависимость остаточных напряжений в пластине от времени обработки при различной амплитуде  $A$  ультразвуковых колебаний

Из графика на рис. 2 видно, что интенсивность удаления остаточных напря-

жений из пластины под действием ультразвуковых колебаний инструмента носит затухающий характер. В начале обработки величина остаточных напряжений резко уменьшается, а после нескольких секунд обработки скорость изменения остаточных напряжений снижается, с течением времени они асимптотически приближаются к нулю. Согласно выражению (1), характер изменения остаточных напряжений соответствует показательной функции с основанием меньше единицы. Такой характер зависимости объясняется тем, что чем меньше величина остаточных напряжений, тем меньшая доля энергии упругой деформации пластины поглощается ее материалом, а следовательно, и меньшая доля остаточных напряжений удаляется из материала пластины. Чем больше амплитуда ультразвуковых колебаний, тем интенсивнее происходит снижение остаточных напряжений, так как при этом затрачивается большая энергия упругой деформации пластины.

График на рис. 3 показывает зависимость величины остаточной деформации пластины от продолжительности воздействия и амплитуды ультразвуковых колебаний. Из графика видно, что с увеличением времени обработки накопленная остаточная деформация пластины возрастает, но характер этой зависимости соответствует сумме геометрической прогрессии. Таким образом, с течением времени накопленная остаточная деформация асимптотически стремится к определенной величине, зави-

сящей от энергии деформации пластины. Чем больше амплитуда колебаний, тем накопленная величина остаточной деформации выше, а время стабилизации накопленной деформации пластины меньше. Объясняется это тем, что энергия деформации пластины в направлении действия внешней нагрузки больше, чем в противоположном направлении, и эта разница возрастает с возрастанием амплитуды колебаний. Поэтому накопленная остаточная деформация в направлении действия внешней нагрузки не в полной мере компенсируется остаточной деформацией в противоположном направлении, что приводит к возрастанию результирующей накопленной остаточной деформации. Следовательно, для уменьшения величины остаточной деформации амплитуду колебаний инструмента следует уменьшать, но при этом требуется значительно увеличить время обработки.

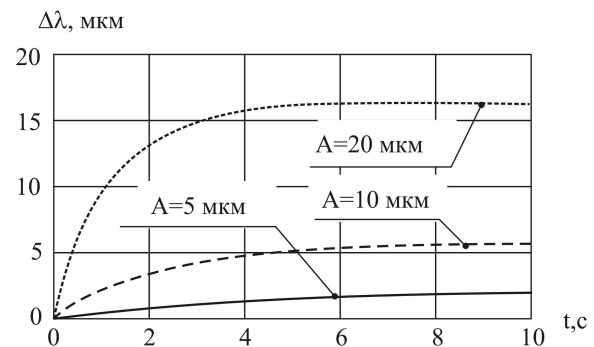


Рис. 3. Зависимость накопленной деформации пластины  $\Delta\lambda$  от времени обработки  $t$  и амплитуды  $A$  ультразвуковых колебаний

### Заключение

Проведенное компьютерное моделирование ультразвуковой релаксации остаточных напряжений позволило установить и наглядно представить зависимости остаточных напряжений и деформаций упругих пластин, применяемых в датчиках давления, от амплитуды и продолжительности ультразвуковой обработки. Из полученных графических зависимостей следует, что продолжительность ультразвуковой обработки, обеспечивающая практически полное снятие остаточных напряжений, составля-

ет от 10 до 50 секунд в зависимости от амплитуды колебаний. Эти результаты подтверждают предположение о высокой производительности ультразвукового способа стабилизации упругих пластин датчиков давления и могут служить основанием для разработки и внедрения технологии ультразвуковой стабилизации упругих чувствительных элементов датчиков давления в качестве замены в десятки раз менее производительной технологии «тренировки» пластин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биронт, В.С. Релаксация остаточных напряжений при ультразвуковой обработке / В.С. Биронт, В.А. Суших, Е.В. Южакова, А.С. Фофанова, Т.В. Байдина // *Материаловедение и термическая обработка металлов*. - 1984. - № 6. - С. 57-60.
  2. Королев, А.В. Ультразвуковая стабилизация размеров колец подшипников с пластмассовыми ребрами / А.В. Королев, В.В. Болкунов, С.В. Слесарев, А.А. Королев // *СТИН*. - 2006. - № 9. - С. 38-40.
  3. Королев, А.В. Сравнительный анализ ультразвукового и термического методов релаксации остаточных напряжений / А.В. Королев, А.Ф. Балаев, С.А. Савран, Т.А. Балтаев, А.С. Яковиншин // *Наука, технологии и инновации в современном мире*. - 2015. - № 1 (2). - С. 47-50.
  4. Балтаев, Т.А. Технология стабилизации остаточных напряжений в упругих чувствительных элементах приборов давления на основе применения ультразвуковой энергии / Т.А. Балтаев, А.В. Королев, А.А. Королев, А.Ф. Балаев, С.А. Савран // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. - 2015. - № 12. - С. 39-41.
  5. Колбасников, Н.Г. Теория обработки металлов давлением. Сопротивление деформации и пластичность / Н.Г. Колбасников. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. - 314 с.
- 
1. Biront, V.S. Residual stresses relaxation at ultrasonic machining / V.S. Biront, V.A. Sushchikh, E.V. Yuzhakova, A.S. Fofanova, T.V. Baidina // *Material Science and Thermal Treatment of Metals*. - 1984. - № 6. - pp. 57-60.
  2. Korolyov, A.V. *Dimension Ultrasonic Stabilization of Racers with Plastic Bearing Ribs* / A.V. Korolyov, V.V. Bolkunov, S.V. Slesarev, A.A. Korolyov // *STIN*. - 2006. - № 9. - pp. 38-40.
  3. Korolyov, A.V. Comparative analysis of ultrasonic and thermal methods of relaxation of residual stresses / A.V. Korolyov, A.F. Balaev, S.A. Savran, T.A. Baltaev, A.S. Yakovishin // *Science, Techniques and Innovations in Modern World*. - 2015. - № 1 (2). - pp. 47-50.
  4. Baltaev, T.A. Residual stresses stabilization technology in elastic sensitive elements of pressure devices based on ultrasonic power application / T.A. Baltaev, A.V. Korolyov, A.A. korolyov, A.F. Balaev, S.A. Savran // *Assemblage in Mechanical Engineering, Instrument Making Industry*. - 2015. - № 12. - pp. 39-41.
  5. Kolbasnikov, N.G. *Theory of Metal Forming. Deformation Resistance and Plasticity* / N.G. Kolbasnikov. - S-Pb.: Publishing House of S-PbTU, 2000. - pp. 314.

Статья поступила в редколлегию 23.12.16.

Рецензент: д.т.н., профессор Волгоградского государственного технического университета Чигиринский Ю.Л.

## Сведения об авторах:

**Балаев Андрей Федорович**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Саратовского го-

**Balaev Andrey Fyodorovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Gagarin

сударственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, e-mail: [bandrey.sc@gmail.com](mailto:bandrey.sc@gmail.com).

State Technical University of Saratov, e-mail: [bandrey.sc@gmail.com](mailto:bandrey.sc@gmail.com).

## Транспорт

УДК 625.282

DOI: 10.12737/article\_59b11cb6e8c169.20262273

Е.В. Сливинский, В.И. Киселёв

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ ТЕПЛОВОЗА ТЭП60

Представлены материалы, касающиеся разработки перспективной конструкции поводковых устройств для ходовых частей тепловозов. Разработка рекомендована научно-исследовательским и промышленным структурам в области тяжёлого машиностроения как в нашей стране, так и за ру-

бежом с целью ее дальнейшего изучения и возможного внедрения в практику.

**Ключевые слова:** тяговый электродвигатель, колёсная пара, поводок, рессорное подвешивание.

E. V. Slivinsky, V. I. Kiselyov

## UNDERCARRIAGE MODERNIZATION OF DIESEL LOCOMOTIVE TEP60

It is well-known, that during the motion of locomotives on curved areas of a track one observes an increased wear of flanges in wheel pairs. It is a considerable drawback of three-axle bogies of locomotives. To eliminate such a drawback in Bunin ESU is developed at the invention level a promising design of a

three-axle bogie of a locomotive having increased operation reliability at the expense of the use of a promising RUKP design.

**Key words:** propulsion electromotor, wheel pair, lever, spring suspension.

## Введение

В настоящее время на отечественном железнодорожном транспорте широко применяются различные по конструкции магистральные грузовые и пассажирские тепловозы, снабжённые трёхосными бесчелюстными тележками. Так, например, тележка, используемая на тепловозе ТЭ116, состоит из рамы, на которой навешены колёсно-моторные блоки, снабжённые буксами, которые при помощи поводков соединены с упомянутой рамой [2]. Рама подпружинена относительно букс винтовыми пружинами сжатия. Поводки букс состоят из собственно поводка, одинарного резинового амортизатора, двойного резинового амортизатора, торцового амортизатора, дистанционного кольца, упорного разъемного кольца и штифтов. По условиям сборки с буксой и рамой тележки поводок несимметричен относительно продольной оси. В длинное гнездо поводка запрессован двойной амортизатор, а в короткое гнездо - одинарный. Поводок изготовлен из стали 40 путем штамповки и в средней части имеет высоту 50 мм и ширину 90 мм. Одинарный амортизатор по-

водка представляет собой валик с трапециевидными посадочными концами. Между наружной стальной втулкой амортизатора и средней частью валика запрессована резиновая втулка, которая после запрессовки имеет толщину 7 мм. Свойства резины амортизатора: марка 7842, тип V, гр. МС ТУ38.105.376-72, твердость 60-70 единиц по Шору. После формирования амортизатор выдерживают в течение трех недель при температуре 20-30° С без света, затем поверхность наружной стальной втулки обрабатывают окончательно по диаметру 84П13 и торцам. При проверке в центрах допускается биение наружной поверхности втулки амортизатора по диаметру 84 мм до 0,1 мм, конусность и овальность этой поверхности должны находиться в пределах поля допуска.

Двойной амортизатор отличается от одинарного длиной валика, а также расчленением длины наружной стальной и резиновой втулок на две половины. В среднюю часть двойного амортизатора при запрессовке его в поводок закладывают дистанционное кольцо, состоящее из двух

половин. Двойной амортизатор формируют тем же способом, что и одинарный. Торцовый амортизатор состоит из наружных шайб, изготовляемых из стали 40, и привулканизированного к ним кольца из резины (марка 2959, тип V, гр. МС ТУ 38.105.376-72) толщиной 16 мм. Торцовые амортизаторы формируют на заводе резиновой промышленности.

Поводок буксы имеет четыре торцовых амортизатора, каждый из которых соединен с ним четырьмя штифтами диаметром 6 мм. Торцовые амортизаторы, собранные на поводке, сжимаются на 3 мм каждый разъемными упорными кольцами, которые закладывают в соответствующие проточки валика амортизатора и фиксируют по отношению к наружной шайбе амортизатора приваркой каждого полукольца в трех точках. Собранный поводок трапецевидными концами валика одинарного амортизатора вставляют в соответствующие гнезда осевой буксы, а трапецевидными концами валика двойного амортизатора - в гнезда скоб поводка рамы тележки, после чего поводок фиксируют относительно рамы тележки и буксы четырьмя болтами М20.

Ввиду несимметричности поводков по отношению к продольной оси имеются два типа поводков, отличающиеся расположением узких частей клиновых хвостовиков.

Всего на тепловозе 24 поводка, по 12 поводков каждой формы. При соединении поводков с рамой тележки и буксами предусмотрен натяг не менее 4,5 мм для компенсации обмина конических посадочных поверхностей поводка, скоб рамы тележки и буксы тележки в эксплуатации.

Конструкция тележки тепловоза ТЭП60, несмотря на эффективность её использования, имеет ряд существенных недостатков, а именно: поводки букс имеют недостаточную надёжность ввиду наличия в них упругих элементов с низким сроком службы; колёсные пары не могут при входе тепловоза в кривую пути располагаться радиально относительно центра траектории кривой, что способствует повышенному износу гребней колёс; при движении тепловоза по прямому участку пути плавность его хода недостаточно высока из-за влияния колёсных пар, причём такой недостаток характерен для всех известных тепловозов, имеющих трёхосные бесчелюстные тележки; сложность конструкции тележки за счёт использования рессорного подвешивания, выполненного в виде винтовых пружин сжатия, не способных в автоматическом режиме изменять свою жёсткость и тем самым эффективно гасить динамические составляющие колебаний подпрыгивания.

### Описание конструкции и работы перспективной тележки

С учетом важности проблемы устранения описанных недостатков, присущих как отечественным, так и подобным зарубежным типам тепловозов, в ЕГУ им. И.А. Бунина совместно с МИИТ проводится бюджетная НИР на тему «Динамика, прочность и надёжность транспортных, сельскохозяйственных и строительно-дорожных машин, а также промышленного стандартного и нестандартного оборудования применительно к Чернозёмному региону РФ». Проводится широкомасштабная научно-исследовательская работа, одним из разделов которой является изучение причин, связанных с указанными недостатками, и разработка конкретных

предложений по исключению данных отрицательных явлений.

Рассмотрим разработанную нами конструкцию перспективной тележки тепловоза, которая признана изобретением (RU2543125). На рисунке показаны часть тележки (вид сбоку, со стороны торцовой её части) и укрупненная деталь рессорного подвешивания тележки с разрезами.

Такая тележка тепловоза состоит из рамы 1 и колесных пар 2 (на рисунке показана только одна колесная пара), на которые подвешены тяговые электродвигатели 3. На буксах 4 колесных пар 2 шарнирно установлены поводки 5, к которым жестко присоединены пустотелые упругие стержни 6 и расположенные в них оси 7.



Пустотелые упругие стержни 6 установлены подвижно в неподвижных опорах 8, жестко закрепленных на раме 1, и снабжены шлицами 9, взаимосвязанными с подобными, выполненными в подвижных опорах 10, которые расположены в направляющих 11, также жестко закрепленных на раме 1. Оси 7 снабжены длинноходовой резьбой 12, взаимодействующей с ответной резьбой, выполненной в подвижных опорах 10. Тележка локомотива перемещается по рельсовому пути 13.

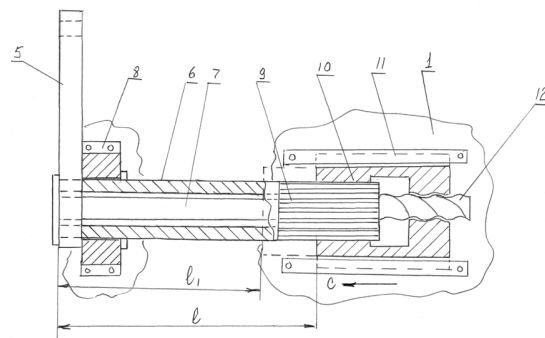
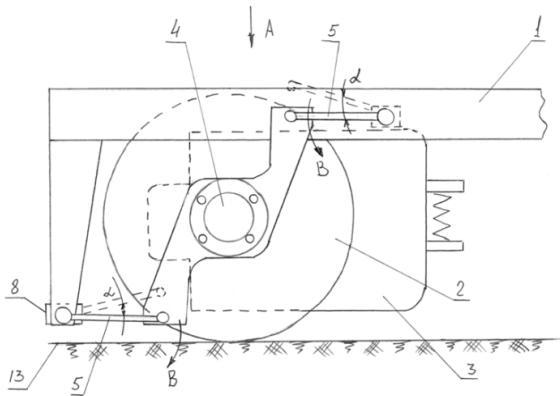


Рис. Конструкция тележки (RU2543125)

Предположим теперь, что локомотив находится в движении и под действием неровностей пути происходят вертикальные его перемещения по стрелке А. Такие перемещения обеспечат поворот на некоторый угол поводков 5, например по стрелкам В. При таком угловом повороте поводков 5 за счет жесткой их связи с пустотелым упругим стержнем 6 последний также закручивается на некоторый угол (за счет того, что он закреплен с помощью шлицев 9 в подвижной опоре 10). При этом его рабочая длина равна  $l$ . После исчезновения нагрузки описанные конструкционные элементы возвращаются в исходное положение, показанное на рисунке, за счет упругих свойств пустотелого упругого стержня 6, демпфируя тем самым указанное динамическое воздействие.

### Расчёт конструкционных параметров тележки

Для расчёта основных геометрических параметров поводка с возможной привязкой его, например, к тепловозу ТЭП60 принята следующая известная методика [2].

Работает тележка локомотива следующим образом. Перед установкой рамы 1 тележки в процессе её сборки на буксы 4 поводки 5 расположены под углом  $\alpha$  к горизонту, например так, как это показано пунктиром на рисунке. При соединении с буксами они под действием собственного веса рамы 1 и собственного веса кузова локомотива (на рисунке он не показан) займут положение, показанное на рисунке.

Теперь рассмотрим случай, когда амплитуда колебаний еще более возрастает. Тогда подвижная опора 10 за счет наличия длинноходовой резьбы 12 переместится в направляющих 11 по стрелке С. При этом рабочая длина пустотелого упругого стержня 6 уменьшится до размера  $l_1$ , что позволит увеличить его крутильную жесткость и погасить эту динамическую составляющую. Такое увеличение жесткости подтверждается известной зависимостью

$$K_{\varphi} = \frac{GJ}{ld^2} \text{ Н/мм}, \text{ где } d - \text{ диаметр упругого}$$

стержня, а  $l$  - его длина. После исчезновения нагрузки детали рессорного подвешивания вновь займут исходное положение. Далее описанные процессы могут повторяться неоднократно.

Тепловоз ТЭП60 имеет тележки, состоящие из рамы, колёсных пар, букс, рессорного подвешивания, тягового привода и тормозной системы. Приведем пример численного расчета геометрических и ки-

нематических параметров торсионных поводков, выполненного в следующей последовательности.

Исходя из того, что на одну колесную пару тепловоза действует реальная статическая нагрузка 226 кН, к рычагу одного торсионного поводка будет приложена сила  $N_{ст} = 226/4 = 56,5$  кН. Известно, что рабочая нагрузка на поводковый комплект  $N_{\delta}$  (динамическая) при скорости  $V =$

$$d_T = \sqrt[3]{\frac{16N_{\Sigma}l_1}{\pi[\tau]}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 21,1 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 600}} = \sqrt[3]{179193} = 56,8 \text{ мм},$$

где  $[\tau] = 600$  МПа для стали 65С2ВА (согласно ГОСТ 14959-79).

В соответствии с сортаментом на прокат окончательно назначим диаметр стержня торсиона, равный 60 мм. Исходя из конструктивных соображений, зададимся длиной рабочей части торсиона (пустотелый стержень на рисунке)  $l = 600$  мм.

$$\tau = \frac{16M_{кр}}{\pi d_T^3} = \frac{16 \cdot 21,1 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 60^3} = 498 \text{ МПа} \leq 600 \text{ МПа}$$

Прочность торсиона обеспечена, так как  $\tau \leq [\tau]$ . Теперь определим перемещение рычага торсиона (поводка), а следовательно

$$\Delta_c = 2l_1 \sin \frac{\gamma_c}{2} = 2 \cdot 300 \cdot \sin \frac{9^\circ}{2} = 600 \cdot 0,0784 = 47 \text{ мм}$$

Как было отмечено выше, движение тепловоза ТЭП60 (с учетом неровностей пути) со скоростью 160 км/ч вызывает дополнительную нагрузку  $N_{\Sigma} = 70,5$  кН на рычаг торсиона (поводок), сопровождающуюся колебаниями его кузова. При этом за счёт углового перемещения рычага торсиона (поводка) длина торсиона снизится с

$$\Delta_{\delta} = 2l_1 \sin \frac{\gamma_c}{2} = 2 \cdot 300 \cdot \sin \frac{7,01^\circ}{2} = 600 \cdot 0,0612 = 36,7 \text{ мм}$$

Видно, что перемещения экипажной части тепловоза в динамике снизились на 10,3 мм. Это произошло за счёт увеличе-

$$J_c = \frac{N_{cm}}{\Delta_c} = \frac{56500}{47} = 1202,1 \text{ Н/мм}, J_{\delta} = \frac{N_{\Sigma}}{\Delta_{\delta}} = \frac{70500}{36,7} = 1921 \text{ Н/мм}.$$

Следует также отметить, что поводки, которые применяются в бесчелюстных тележках тепловозов и имеют жесткость

160 км/ч не превысит 0,25 % от статической нагрузки, т.е. в данном случае 14 кН. Тогда суммарная нагрузка на каждый из поводков составит  $N_{\Sigma} = N_{СТ} + N_{\delta} = 56,5 + 14 = 70,5$  кН, а момент, приложенный к стержню торсиона, определится как  $M_{кр} = N_{\Sigma}L = 70,5 \cdot 0,3 = 21,1$  кН·м. Здесь  $L$  - длина приводного рычага торсиона (поводка), принятая равной 300 мм.

Вычислим диаметр стержня торсиона:

Тогда угол закручивания торсиона при статическом нагружении составит

$$\gamma_c = \frac{2l[\tau]}{Gd_T} = \frac{2 \cdot 600 \cdot 600}{8 \cdot 10^4 \cdot 60} = 0,15 \text{ рад} = 8,55^\circ.$$

Проверим торсион по условию прочности при кручении:

но, и экипажной части тепловоза от действия статической нагрузки торсиона:

600 мм, например, до 550 мм. Угол закручивания торсиона в этом случае составит

$$\gamma_{\delta} = \frac{2l[\tau]}{Gd_T} = \frac{2 \cdot 550 \cdot 600}{8 \cdot 10^4 \cdot 60} = 0,1375 \text{ рад} = 7,01^\circ,$$

а перемещения от такого динамического нагружения будут равны

ния жёсткости стержня торсиона с  $J_c$  до  $J_{\delta}$ , т.е. в 1,6 раза:

3675 Н/м в поперечном направлении и 25200...29400 Н/м - в продольном, не могут быть использованы в предложенном

техническом решении ввиду того, что они по характеру нагружения выполняют роль рессор, и если торсионы заменяют последние, то поводки - нет. Поводки в указанной конструкции выполнены из пружинной стали 60С2, имеют прямоугольное сечение высотой  $h = 170$  мм, толщину  $\delta = 40$  мм и длину  $L = 300$  мм. Такие геометрические характеристики в случае входа тележки в кривую пути обеспечат под действием боковой силы, вызванной набеганием гребня колеса на головку рельса и обычно равной 5,5-6,0 т, поперечную угловую деформацию поводка. Это создаст условие для расположения колёсной пары по радиусу относительно центра образующей траектории рельсового пути, а после её прохождения позволит колёсной паре, за счёт сил упругой деформации последнего, занять прямолинейное положение.

Для автоматизации расчётов по выбору материала и геометрических характе-

ристик предложенной конструкции поводков для локомотивов различных моделей, имеющих бесчелюстные тележки, разработана программа для ЭВМ на языке Delphi, которая апробирована на представленных выше расчётах.

Для экономической оценки предложенного технического решения использована методика финансово-инвестиционного анализа и аудита при внедрении новой техники. В качестве базового образца принята конструкция тележки для тепловоза ТЭП60, металлоёмкость которой снижена примерно на 6 %. Расчёты показали, что прибыль, которую получит предприятие от постановки на производство одной тележки тепловоза ТЭП60, с учётом использования в конструкции перспективных поводков, выполненных в виде торсионов, составит в год 373,6 тыс. руб.

### Заключение

Результаты исследования рекомендуются как отечественным, так и зарубежным НИИ, конструкторским и производственным структурам локомотивостроения

для дальнейшего изучения и доработки предложенной конструкции тележки с целью возможного внедрения её в практику.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железнодорожный транспорт: энциклопедия / гл. ред. Н.С. Конарев. - М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. - 559 с.

2. Повышение надёжности экипажной части тепловозов / А.И. Беляев [и др.]; под ред. Л.К. Добрынина. - М.: Транспорт, 1984. - 248 с.

1. Railway Transport: Encyclopedia / editor-in-chief N.S. Konarev. - M.: Great Encyclopedia, 1994. - pp. 559.

2. Reliability Increase of Crew Section in Locomotives / A.I. Belyaev [et al.]; under the editorship of L.K. Dobrynin. - M.: Transport, 1984. - pp. 248.

*Статья поступила в редколлегию 23.06.2016.*

*Рецензент: к.т.н., доцент  
Елецких С.В.*

### Сведения об авторах:

**Сливинский Евгений Васильевич**, д.т.н., профессор кафедры «Механика и технологические процессы» Елецкого государственного университета им. И.А.Бунина, e-mail: [evgeni\\_sl@mailo.ru](mailto:evgeni_sl@mailo.ru).

**Киселёв Валентин Иванович**, д.т.н., профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина, e-mail: [kiselev40@mail.ru](mailto:kiselev40@mail.ru).

**Slivinsky Evgeny Vasilievich**, D. Eng., Prof. of the Dep. of Mechanics and Technological Processes, Bunin State University of Yelets, Phone: 8 920 246 86 81, e-mail: [evgeni\\_sl@mailo.ru](mailto:evgeni_sl@mailo.ru).

**Kiselyov Valentin Ivanovich**, D. Eng., Prof. of the Dep. "Electric Trains and Locomotives", Bunin State University of Yelets, e-mail: [kiselev40@mail.ru](mailto:kiselev40@mail.ru).

УДК 621.791

DOI: 10.12737/article\_59b11cbc45bad5.54903310

А.И. Комаров, А.В. Вдовин, А.Л. Забелин

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВКЛАДЫШЕЙ КОРЕННЫХ И ШАТУННЫХ ОПОР КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ D-355C «KOMATSU»

Рассмотрены вопросы восстановления деталей импортной строительной техники. Приведены результаты разработки технологии восстановления вкладышей коренных и шатунных опор коленчатого вала двигателя D-355C «Komatsu». Проведен анализ характера разрушения вкладышей шатунных опор. Разработана технология восстановления

вкладышей посредством нанесения баббита B88 методом электродуговой металлизации. Разработаны и приведены параметры режима дуговой металлизации.

**Ключевые слова:** восстановление, вкладыши шатунных опор, баббит, электродуговая металлизация.

A.I. Komarov, A.V. Vdovin, A.L. Zabelin

## TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR BUSHES REBUILDING OF CRANKSHAFT- AND CRANKPIN BEARINGS FOR CRANKSHAFT OF ENGINE D-355C “KOMATSU”

The problems in rebuilding parts of imported architectural engineering are considered. The results of the technology development for rebuilding bushes of crankshaft- and crankpin bearings of a crankshaft for the engine D-355 “Komatsu” are shown. The analysis of the destruction character of crankpin bearing bushes

is presented. A rebuilding technology for bushes by means of applying babbitt B88 with arc spraying is developed. The parameters of an arc spraying mode are developed and shown.

**Key words:** rebuilding, bushes of crankpin bearings, babbitt, arc spraying.

При строительстве нефтегазопроводов в нашей стране широко применяется строительная техника таких фирм, как «Cato», «Komatsu», «Hitachi» и т.д.

Стоимость запасных частей на эту технику очень высокая, поэтому возникла необходимость восстановления изношенных деталей импортной техники.

В данной статье приведены результаты разработки технологии восстановления вкладышей коренных и шатунных опор коленчатого вала двигателя D-355C «Komatsu».

Конструктивно вкладыши коренных и шатунных опор коленчатого вала двигателя 355C «Komatsu» выполнены по одной схеме с небольшими различиями. Условия работы этих деталей также одинаковы и представляют собой гидродинамическую смазку трущихся поверхностей с образованием масляного клина.

Номенклатура и геометрические размеры вкладышей приведены в таблице.

Внешний вид вкладышей показан на рис. 1.

Как видно, имеется три разновидности вкладышей, состоящих из двух полувкладышей – нагруженного и ненагруженного.

Нагруженные полувкладыши имеют гладкую рабочую поверхность, а ненагруженные полувкладыши выполнены с кольцевыми смазочными канавками и отверстием для подачи смазки в подшипник скольжения.

С технологической точки зрения все полувкладыши представляют собой «слоёный пирог» – *триметалл*, конструкция и состав которого показаны на рис. 2.

Толщина наружного стального слоя составляет 3 мм, толщина внутреннего рабочего слоя - 0,10...0,15 мм. Толщина промежуточного слоя изменяется от 0,25 до 0,75 мм.

Таблица

## Номенклатура и геометрические размеры вкладышей

№ по каталогу	Назначение полувкладыша	Внутренний диаметр, мм	Длина, мм	Наличие смазочных отверстий	Наличие смазочных канавок	Наличие холодильников	Кол-во в комплекте
6127-21-8221	Коренной широкий нагруженный	125	74	–	–	Есть	2
6127-21-8212	Коренной широкий ненагруженный	125	74	Одно отверстие $\phi$ 11 мм	Две кольцевые канавки, соединенные канавкой и отверстием	Есть	2
66127-21-8121	Коренной узкий нагруженный	125	48	–	–	Есть	5
6127-21-8111	Коренной узкий ненагруженный	125	48	Одно отверстие	Одна кольцевая канавка	Есть	5
6127-31-3422	Шатунный нагруженный	102	61	–	–	–	6
6127-31-3412	Шатунный ненагруженный	102	61	Одно отверстие	Одна кольцевая канавка	–	6

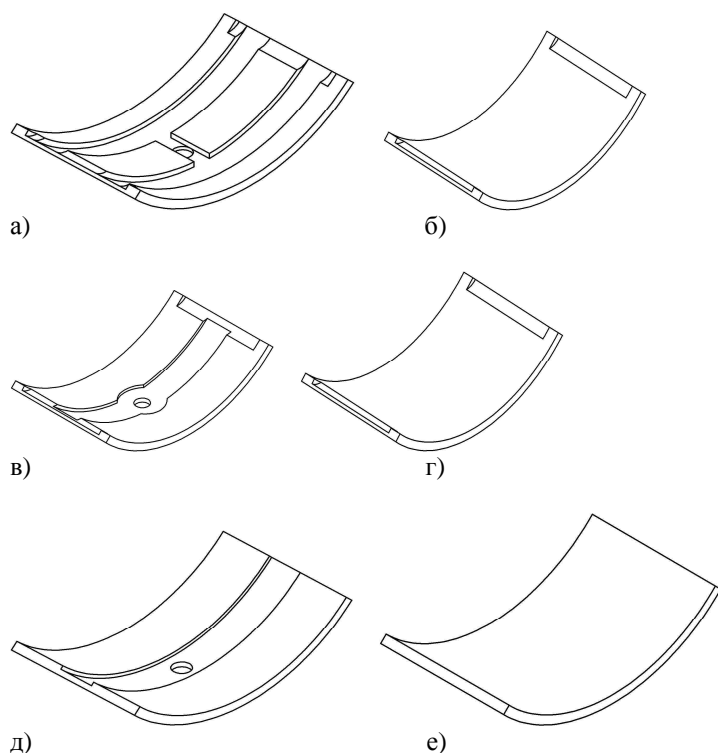


Рис. 1. Конструкция вкладышей двигателя D-355С:  
 а – 6127-21-8212 – полувкладыш коренной верхний;  
 б – 6127-21-8221 – полувкладыш коренной нижний;  
 в – 6127-21-8111 – полувкладыш коренной верхний;  
 г – 6127-31-8121 – полувкладыш коренной нижний;  
 д – 6127-31-3412 – полувкладыш шатунный верхний;  
 е – 6127-31-3422 – полувкладыш шатунный нижний

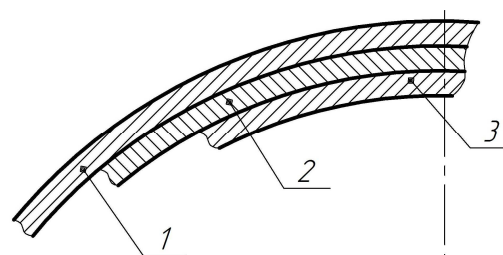


Рис. 2. Конструкция вкладыша:  
 1 – основа (сталь 08кп);  
 2 – накладка (предохранительный слой – свинцовая бронза: 75 % *Cu*; 25 % *Pb*);  
 3 – рабочий (антифрикционный) слой (низкооловянистый баббит: 90 % *Pb*; 10 % *Sn*)

Подшипники подобной конструкции в условиях гидродинамической смазки работают практически без износа, однако по разным причинам они все же выходят из строя.

Кроме аварийных ситуаций, вызванных неправильной эксплуатацией, можно выделить следующие факторы:

1. Неблагоприятные условия в пусковые периоды.
2. Отклонение от соосности опор и шеек вала.
3. Кавитационные разрушения.

Все вышеизложенное говорит о том, что в процессе эксплуатации разрушается рабочий слой вкладышей и возникает необходимость восстановления рабочего слоя с сохранением работоспособности вкладышей [1;2].

Наилучшим способом восстановления вкладышей коренных и шатунных опор коленчатого вала, на наш взгляд, является процесс электродуговой металлизации, позволяющий нанести тонкослойное покрытие из баббита марки Б88 на изношенный триметалл вкладыша [3;4].

Баббит марки Б88 содержит 88% *Sn*, 7,5% *Sb* и 3% *Cu*. По техническим условиям в нём допускаются следующие колебания основных компонентов: 7,3...7,8% *Sb*, 2,5...3,5% *Cu*, примесей – не более 0,10% *Pb*, 0,05% *Fe* и 0,05% *Bi*.

Микроструктура напыленного баббита Б88 представляет собой звёздочные кристаллы химического соединения  $Cu_3Sn$  на фоне твёрдого раствора сурьмы и меди в олове [5;6].

Режим напыления был выбран из условия получения мелкодисперсного распыления баббита и обеспечения наиболее высокой адгезии [7].

Параметры режима электродуговой металлизации: ток металлизации  $I_n$  – 100...120 А; напряжение дуги  $U_d$  – 23...25 В; число оборотов при металлизации  $n$  – 75-85 об/мин; давление сжатого воздуха  $P_v$  – 0,4...0,6 МПа.

Процесс электродуговой металлизации вкладышей баббитом Б88 с предварительной обработкой поверхности в дробеструйной камере осуществлялся с применением специально разработанных оправок.

Для соблюдения жёстких требований по разнотолщинности вкладышей для их окончательной механической обработки используется вертикальный координатно-расточный станок с центровкой оправки по специальному центрирующему отверстию.

Как показали работы по изготовлению опытной партии вкладышей, напыленные покрытия выдерживают механическую обработку резанием, шероховатость поверхности не превышает  $R_a$  0,4 мкм, а разнотолщинность вкладышей после обработки находится в пределах 0,05 мм.

По разработанной технологии была изготовлена партия вкладышей коренных опор коленчатого вала двигателя D-355С и отправлена заказчику для установки на серийный двигатель для проведения стендовых испытаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин, Е.А. Тепловозные диски типа Д49 / Е.А. Никитин, В.М. Швыряев, В.Г. Быков [и др.]; под ред. Е.А. Никитина. – М.: Транспорт, 1982. – 225 с.
2. Справочник по восстановлению деталей / Е.Л. Воловик. – М.: Колос, 1981. – 351 с.
3. Сонин, В.И. Газотермическое напыление материалов в машиностроении / В.И. Сонин. – М.: Машиностроение, 1973. – 152 с.
4. Антошин, Е.В. Газотермическое напыление покрытий / Е.В. Антошин. – М.: Машиностроение, 1974. – 95 с.
5. Шнагин, А.И. Антифрикционные сплавы / А.И. Шнагин. – М.: Металлургия, 1956. – 320 с.
6. ГОСТ 1320-74 (ИСО 4383-91). Баббиты оловянные и свинцовые. Технические условия.
7. Кречмер, Э. Напыление керамики, металлов и пластмасс / Э. Кречмер; под ред. М.Е. Морозова, И.А. Немковского. – М.: Машиностроение, 1966. – 430 с.

1. Nikitin, E.A. *Diesel Locomotive Disks of D49 Type* / E.A. Nikitin, V.M. Shvyryaev, V.G. Bykov [et al.]; under the editorship of E.A. Nikitin. – M.: Transport, 1982. – pp. 225.
2. *Reference Book on Parts Rebuilding* / E.L. Volovik. – M.: Kolos, 1981. – pp. 351.
3. Sonin, V.I. *Gas-Thermal Material Spraying in Mechanical Engineering* / V.I. Sonin. – M.: Mechanical Engineering, 1973. – pp. 152.
4. Antoshin, E.V. *Gas-Thermal Spraying of Coatings* / E.V. Antoshin. – M.: Mechanical Engineering, 1974. – pp. 95.
5. Shnagin, A.I. *Antifriction Alloys* / A.I. Shnagin. – M.: Metallurgy, 1956. – pp. 320.
6. SSR 1320-74 (ISO 4383-91). *Tin and Lead Babbitts. Technical Specifications.*
7. Krechmer, E. *Ceramic Metal and Plastic Spraying* / E. Krechmer; under the editorship of M.E. Morozov, I.A. Nemkovsky. – M.: Mechanical Engineering, 1966. – pp. 430.

Статья поступила в редколлегию 30.03.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Макаренко К.В.

#### Сведения об авторах:

**Комаров Александр Иванович**, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-09-93.

**Вдовин Александр Викторович**, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение»

**Komarov Alexander Ivanovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering and Material Science”, Bryansk State Technical University, Phone: (4832)56-09-93.

**Vdovin Alexander Victorovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering and Materi-

ального государственного технического университета, e-mail: [vdovin.alexander.v@yandex.ru](mailto:vdovin.alexander.v@yandex.ru).

**Zabelin Alexey Leonidovich**, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, e-mail: [swordfish\\_74@mail.ru](mailto:swordfish_74@mail.ru).

al Science”, Bryansk State Technical University, e-mail: [vdovin.alexander.v@yandex.ru](mailto:vdovin.alexander.v@yandex.ru).

**Zabelin Alexey Leonidovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering and material Science”, Bryansk State Technical University, e-mail: [swordfish\\_74@mail.ru](mailto:swordfish_74@mail.ru).

**ПРАВИЛА**  
**направления, рецензирования и опубликования научных статей**  
**в журнал «Вестник Брянского государственного технического университета»**

1. К публикации принимаются научные и научно-технические статьи, отражающие результаты исследований, проведенных автором (авторами), научные обзоры, итоговые материалы научных мероприятий (симпозиумов, конференций, семинаров и т.д.), которые должны соответствовать тематике журнала.

2. Авторы должны предоставлять оригинальные работы, содержащие достоверные результаты проделанной научной работы. При использовании текстовой или графической информации, заимствованной из работ других лиц, необходимы ссылки на соответствующие публикации. Если элементы рукописи ранее уже были опубликованы, то авторам необходимо сослаться на более раннюю работу, указав отличие новой работы от предыдущей.

3. Подача статьи в более чем один журнал является неприемлемой и расценивается как неэтичное поведение авторов.

4. Для публикации статьи в журнале в редакцию представляются в электронном виде:

- текст статьи с подписями всех авторов (файл с расширением .pdf);
- текст статьи (файл с разрешением .doc; Word-2003);
- рецензия-рекомендация доктора наук с подписью рецензента и печатью организации, в которой он работает (файл с расширением .pdf);
- экспертное заключение о возможности опубликования материалов статьи в открытой печати (файл с расширением .pdf);
- письменная рекомендация научного руководителя (для аспирантов, магистрантов и студентов) (файл с расширением .pdf);
- пакет рисунков и иллюстраций (файлы tiff, jpg с расширением растровых иллюстраций не ниже 300 dpi).

Текст статьи должен быть вычитан автором.

5. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. В качестве рецензентов могут быть привлечены члены редакционного совета журнала, обладающие профессиональными знаниями и опытом работы по научному направлению, близкому к теме рукописи авторов. Рекомендации рецензентов являются основанием для принятия решения о публикации статьи. Специалисты, работающие в той же организации, в которой работает и автор (авторы) статьи, не могут выступать в качестве рецензентов. Срок рецензирования - не более 10 дней со дня поступления статьи в редакцию журнала. При наличии рекомендации статьи к доработке или отказе в публикации автору высылается копия рецензии. Рецензии на статьи хранятся в редакции не более 3 лет.

6. Файлы, представляемые в редакцию, должны быть названы по фамилии первого автора (например: Ivanov\_I.I.).

7. Объем статьи - 5-10 страниц формата А4 (режим автоматической расстановки переносов), включая графики, рисунки, таблицы и список литературы.

8. Текст статьи печатается через 1 интервал и должен содержать:

- в левом верхнем углу - УДК (высота букв - 12 пт.);
- справа – инициалы, фамилию автора (авторов) через запятую (высота букв - 12 пт.);
- название статьи (высота прописных букв - 14 пт., шрифт жирный, выравнивание по центру);
- аннотацию (4 – 6 строк; высота букв - 10 пт.; абзац - 7 мм; распределение текста по двум колонкам);
- ключевые слова (6 – 8 слов; высота букв - 10 пт.; абзац - 7 мм; распределение текста по двум колонкам);
- текст статьи (высота букв - 12 пт.; абзац – 10 мм; поля: слева, справа, сверху и снизу – 20 мм);
- список литературы (высота букв - 10 пт., заголовки – прописными буквами);



– сведения об авторах: Ф.И.О. (полностью), ученую степень, ученое звание, должность, место работы, рабочий и домашний телефоны, e-mail (высота букв - 10 пт., заголовок – прописными буквами, выравнивание по правому краю);

– реферат (высота букв - 10 пт.; абзац - 7 мм; распределение текста по двум колонкам).

Ссылку на гранты размещают в конце текста статьи (после раздела «Заключение»).

9. Заглавие статьи должно быть информативным, четко отражать ее содержание в нескольких словах (преимущественно ключевых). Аннотация дает возможность установить основное содержание статьи, определить его релевантность и следует ли читателю обратиться к полному тексту статьи (одним из вариантов построения аннотации является краткое повторение структуры статьи, включающей цели, задачи, методы и результаты). Реферат переводится в редакции журнала на английский язык и имеет целью информировать зарубежного читателя о содержании статьи. Он должен быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не дублировать полученные и опубликованные ранее результаты), содержательным (отражать цель, методы, ход проведенного исследования, результаты, краткие выводы работы), структурированным (следовать логике описания результатов статьи) и компактным (15 – 20 строк).

10. Текст статьи должен быть структурирован. Введение содержит реферативное изложение постановки задачи и возможного применения результатов на практике. Основная часть должна иметь несколько внутренних разделов (с подзаголовками) и содержать формализованную постановку задачи и предлагаемый метод ее решения; отличие предлагаемой постановки задачи от уже известных; преимущество развиваемого метода по сравнению с существующими (содержать пример, подтверждающий работоспособность и эффективность предлагаемого решения). Завершить статью должно содержательное обсуждение (заключение) полученных результатов.

11. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского и греческого алфавитов), цифры, знаки должны быть четкими, различимыми. Все латинские буквы набираются курсивом, все русские и греческие – прямо. Формулы должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0 (версия Word-2003) размером 12 пт.

12. Рисунки, графики, диаграммы, схемы, таблицы и др. графические материалы размещаются внутри текста (после их упоминания) и должны иметь подрисуночные подписи (высота букв - 10 пт., выравнивание по центру), а таблицы – заголовок. Формат обтекания рисунков - «вокруг рамки». На рисунках надписи пишутся прямо, с заглавной буквы, шрифт - Times, высота букв – 10 пт. Формулы должны быть набраны в редакторе, совместимом с MS Word 2010.

13. Список литературы оформляется по ГОСТ 7.1 – 2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание», не должен превышать 10 наименований изданий, напечатанных не ранее 1970 г.

14. Единицы измерения всех физических величин приводятся в СИ.

15. Редакционная коллегия проводит экспертизу комплектности представленных документов (в соответствии с п. 4), анализирует текст статьи на наличие заимствований с использованием системы «Антиплагиат» и рецензирует статьи, используя критерии актуальности, научной новизны, информативности, соответствия основным научно-техническим направлениям журнала.

16. Если статья по рекомендации редакционного совета возвращается на доработку (до 7 рабочих дней), то в журнале указывается дата поступления исправленного текста.

17. Авторам статей гонорар не выплачивается.

18. Статьи, не соответствующие тематике научно-технического журнала и не отвечающие настоящим требованиям, а также представленные с нарушением комплектности, к рассмотрению не принимаются. Рукописи авторам не возвращаются. Редакция не несёт обязательств по рецензированию всех поступающих материалов и не вступает в дискуссию с авторами отклоненных рукописей.



## **Лаборатория волнового деформационного и комбинированного упрочнения в аддитивных и субтрактивных технологиях**

Задачей лаборатории, созданной в 2016 году на базе Брянского государственного технического университета при финансовой поддержке Фонда перспективных исследований, является разработка новой технологии упрочнения металлов и сплавов с использованием волны деформации.

В основе технологии - удар, но не простой, а через промежуточное звено – волновод. При одной и той же энергии удара достигаются разные результаты. Благодаря волноводу формируется волна деформации. Волна деформации - поток импульсов, отличающихся наличием не только головной, но и хвостовой части, которая формируется за счет отражения и наложения упругих волн в бойке, волноводе, упрочняемом изделии. Это позволяет в 10 раз увеличить длительность импульса, в несколько раз увеличить коэффициент полезного действия удара. В результате наложения проходящих и отраженных волн при определенных условиях в монолитном металлическом материале формируется уникальная многослойная гетерогенная, естественно армированная структура, обеспечивающая высокую вязкость и высокую прочность материала одновременно, что способствует многократному повышению эксплуатационных свойств.

Предлагаемая технология волнового деформационного упрочнения может применяться как самостоятельно, так и в составе комбинированных упрочняющих технологий, например, совместно с химико-термической и термической обработкой, как в субтрактивных, так и в аддитивных технологиях.

Субтрактивными называют традиционные технологии, которые связаны с вырезанием изделия из глыбы материала, при этом большая часть материала превращается в стружку. Аддитивные технологии – интенсивно развивающиеся сегодня технологии будущего, связаны с выращиванием готового изделия послойным сплавлением из порошка или из проволоки. Обработка тоже может иметь место, однако, количество стружки в этом случае минимально.

В настоящее время важнейшей задачей аддитивных технологий является обеспечение не только высокой точности изделия, но и качественной структуры материала и высоких эксплуатационных свойств получаемой детали при многократном увеличении производительности. С увеличением производительности резко увеличивается количество дефектов структуры, растет пористость, снижается надежность и ресурс изделия. Предлагается в процессе аддитивного выращивания изделия подвергать материал послойному волновому деформационному упрочнению с целью структурирования, уплотнения, что позволит быстро получать изделия с высокими эксплуатационными свойствами.

Успешное решение поставленной задачи позволит увеличить полезную нагрузку на материал, что таит огромные резервы повышения тактико-технических характеристик изделий в авиации, космонавтике, автомобилестроении, общем машиностроении, инструментальном производстве, энергетической, нефтегазовой и строительной отраслях.

Исследования проводятся в интересах АО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод», Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва, Государственного космического научно-производственного центра имени М.В. Хруничева, АО «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз–Антей», ПАО «Объединённая авиастроительная корпорация».

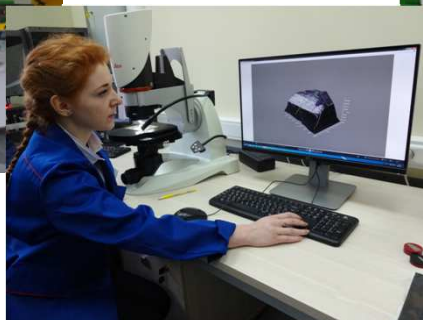


Для достижения поставленных целей выстраиваются партнерские отношения с ведущими научно-исследовательскими центрами страны, такими, как Центральный научно-исследовательский институт материалов (г. Санкт-Петербург), Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (г. Москва), Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (г. Черноголовка), АО Центральный научно-исследовательский институт точного машиностроения (г. Климовск), АО "Центральный научно-исследовательский институт "БУРЕВЕСТНИК" (г. Нижний Новгород).

Практическая востребованность результатов и глубина научной проработки проекта явились основанием для принятия решения Фондом перспективных исследований (ФПИ) и Министерством образования и науки РФ о финансировании исследований лаборатории на три года в объеме более 200 миллионов рублей.

Целью деятельности ФПИ является поддержка научных исследований в интересах обороны страны и безопасности государства, создания качественно производства высокотехнологичной продукции военного, специального и двойного назначения. Все поддержанные ФПИ проекты проходят тщательную комплексную трехуровневую экспертизу.

За всю историю ФПИ поддержано всего 52 проекта, следовательно, далеко не в каждом регионе есть лаборатория фонда. Открытая при Брянском государственном техническом университете лаборатория – единственная не только в Брянской области, но и в прилегающих регионах.



**Тел. (4832) 51-51-38, моб. +7-919-214-04-24**

**(контактное лицо – д-р техн. наук, проф. Киричек Андрей Викторович)**

**E-mail: [avk@tu-bryansk.ru](mailto:avk@tu-bryansk.ru)**



# **В Е С Т Н И К БРЯНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Литературный редактор М.Л. Щербакова  
Корректоры В.А. Ерохина, М.Л. Щербакова  
Компьютерная верстка В.А. Ерохина

---

Подписано в печать 29.08.17. Дата выхода в свет 31.08.17. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Бумага офсетная. Офсетная печать. Усл. печ. л.10,7. Уч.-изд. л. 10,7.  
Тираж 500 экз. Свободная цена. Заказ 90

---

Адрес редакции и издателя:  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».  
241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7, БГТУ., тел. (4832) 58-82-77.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии БГТУ,  
241035, Брянск, ул. Институтская, 16