

# ВЕСТНИК

НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ



## БРЯНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Издается с 2004 года

DOI: 10.12737/issue\_5a795ff6a09121.67342549

№ 1 (62)  
2018

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

Issued since 2004

DOI: 10.12737/issue\_5a795ff6a09121.67342549

№ 1 (62)  
2018

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. Bezyazichny**, 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., (Kolomna)

**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**

**Пашкевич В.М.** Компьютерный контроль точности сборки и приработка червячных передач 4

**Забелин А.Л., Савинов Д.Н.** Анализ применения лазерно-гибридной сварки в производственной среде

**Казакова О.Ю., Гаспарова Л.Б., Казаков А.А.** Влияние радиальной составляющей силы резания и геометрических параметров инструментальной оправки на ее положение в шпинделе станка 18

**Сильченко О.Б.** Пластичное микрошлифование – альтернативный способ обработки хрупких материалов 24

**Информатика, вычислительная техника и управление**

**Кропотов Ю.А., Холкина Н.Е.** Функции регрессии и метод наименьших квадратов в задачах параметрического моделирования в системах обмена информацией акустическими сигналами 29

**Анамова Р.Р., Леонов С.А., Хотина Г.К.** Конструирование изделий авиационного назначения в среде геометрического твердотельного моделирования SolidWorks 35

**Самойлова Е.М.** Программная реализация информационно-измерительного канала вихревокового контроля гибридной интеллектуальной системы мониторинга 45

**Металлургия и материаловедение**

**Низовцев В.Е., Сильченко О.Б., Силуянова М.В., Корнилов А.А., Мыктыбеков Б.** Некоторые модели оценки напряженно-деформированного состояния керамических композиционных материалов с учетом технологических пор 52

**Транспорт**

**Сливинский Е.В., Радин С.Ю.** Исключение самодвижения грузовых вагонов в случае истощения тормоза 64

**Забелин А.Л., Кобищанов В.В., Вдовин А.В.** Перспективы и особенности использования двухосных вагонов на железнодорожном транспорте РФ 69

**Международный открытый форум**

**Богомолов С.А., Спасенников В.В.** Проблемы стандартизации эргономических требований в процессе создания новых систем, изделий и инновационных технологий 73

**Инженерная мысль России:  
личности, идеи, разработки**

**Киричек А.В., Лебедев В.А., Морозова А.В., Тарасов Д.Е.** Бабичев Анатолий Прокофьевич – «мировой лидер в исследовании процессов вибрации...» 85

**CONTENTS****Mechanical engineering  
and engineering science**

**V.M. Pashkevich.** Computer accuracy control of worm gear assemblage and running-in.

**A.L. Zabelin, D.N. Savinov.** Analysis of laser-hybrid welding in production environment

**O.Yu. Kazakova, L.B. Gasparova, A.A. Kazakov.** Impact of cutting force radial component and tool mandrel geometrical parameters upon its position in machine spindle

**O.B. Silchenko.** Plastic microgrinding – alternative method of brittle material machining

**Informatics, computer engineering and management**

**Yu.A. Kropotov, N.E. Kholkina.** Regression functions and least-squares method in problems of parametric modeling in information exchange systems by acoustic signals

**R.R. Anamova, S.A. Leonova, G.K. Khotina.** Design of aircraft product in environment of Solid-Works geometrical solid state modeling

**E.M. Samoilova.** Software-based realization of information-measuring channel for eddy current control of hybrid intelligent monitoring system

**Metallurgy and materials science**

**V.Z. Nizovtsev, O.B. Silchenko, M.V. Siluyanova, A.A. Kornilov, B. Myktybekov.** Some models of ceramic composite materials stress-strain state assessment taking into account technological pores

**Transportation means**

**E.V. Slivinsky, S.Yu. Radin.** Exclusion of freight car spontaneous motion in case of brake depletion

**A.L. Zabelin, V.V. Kobishchanov, A.V. Vdovin.** Prospects and peculiarities of using two-axle cars on railway transport in the Russian Federation

**International open forum**

**S.A. Bogomolov, V.V. Spasennikov.** Ergonomic requirements standardization problems during formation of new systems, products and innovation technologies

**Engineering thought of Russia:  
persons, ideas, developments**

**A.V. Kirichek, V.A. Lebedev, A.V. Morozova, D.E. Tarasov.** Anatoly Prokofievich Babichev – “world leader in investigations of vibration processes...”

## Машиностроение и машиноведение

УДК 621.83.06: 004

DOI: 10.12737/article\_5a795ff85f8061.78036130

В.М. Пашкевич

### КОМПЬЮТЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ СБОРКИ И ПРИРАБОТКИ ЧЕРВЯЧНЫХ ПЕРЕДАЧ

Приведены сведения о методе контроля точности сборки и приработка червячных передач на основе компьютерного анализа гармонических составляющих их кинематической погрешности, а также корреляции результатов такого контроля с

результатами исследований виброакустических характеристик червячных передач.

**Ключевые слова:** компьютерный контроль, точность сборки, приработка, червячные передачи, кинематическая погрешность, спектральный анализ, пятно контакта, распознавание.

V.M. Pashkevich

### COMPUTER ACCURACY CONTROL OF WORM GEAR ASSEMBLAGE AND RUNNING-IN

The paper reports the consideration of problems in worm gear assemblage accuracy formation. Drawbacks of the painting method used for the control of assemblage accuracy are considered in the paper. A method for the assemblage quality assessment using a spectral conversion of a worm gear kinematic error and digital filtering its separate components is offered. A tie of defective gear progressive wear with the intensification in the spectrum of a kinematic error of components divisible by a toothed one is described. The investigation results of the assemblage process with the

use of a computer system developed in Belarusian-Russian University are shown. The behavior of spectral components of a kinematic error in gears with the increased noise level, vibrations is described. There are presented recommendations to ensure worm gear assemblage accuracy at the stages of initial and final control.

**Key words:** computer control, assemblage accuracy, running-in, worm gears, kinematic error, spectral analysis, contact spot, identification.

Червячные редукторы, представляющие собой распространенный тип механических передач, входят в состав многих машин и агрегатов. Широкое применение данного типа приводов обусловлено рядом причин, среди которых повышенная плавность и низкий уровень шума, обеспечение больших передаточных чисел в одной ступени, возможность самоторможения. В то же время обратной стороной этих достоинств являются высокие потери на трение и связанные с этим значительный нагрев и низкий КПД; повышенный износ в зацеплении и склонность передач к заеданию; высокие требования к точности изготовления деталей и точности регулирования передачи в сборе.

Для обеспечения точности сборки червячных передач контролируют величину межосевого расстояния, несовпадение средней плоскости червячного колеса и оси червяка, угол скрещивания осей, а также величину бокового зазора.

Наибольшие трудности при этом вызывает совпадение средней плоскости червячного колеса с осью червяка, которое, в отличие от остальных параметров, как правило, не обеспечивается методом полной взаимозаменяемости. На практике для этой цели используют метод регулирования путем установки между крышками опор червячного колеса и корпусом передачи компенсирующих элементов (прокладок).

Для передач высокой точности (5-6 степени) обеспечение данного параметра не достигается и методом регулирования. На практике используют метод пригонки кольца-компенсатора по результатам измерений параметра, что в еще большей степени снижает технологичность сборочной операции и делает ее точность в значительной мере зависящей от квалификации слесаря-сборщика.

Погрешности сборки и регулирования передач часто приводят к искажению

геометрии зацепления и вызывают при этом резкое увеличение интенсивности износа передач, при грубых нарушениях - уже на этапе приработки. При этом наиболее характерными видами разрушения червячных передач являются усталостное выкрашивание, износ, а также заедание и задиры зубьев червячного колеса [1].

Усталостное выкрашивание возникает вследствие циклических контактных нагрузок, наиболее часто проявляется в передачах с колесами, выполненным из оловянистых мягких бронз, и приводит к появлению на поверхностях зубьев пятен выкрашивания. Однако на практике данный дефект встречается реже, чем заедания и задиры.

Износ зубьев зависит как от шероховатости поверхности червяка, наличия на нем местных дефектов (рисок, надрезов, волнистости на активной поверхности витка), так и от точности сборки и регулировки передач (перекос подшипников, отключение межосевого расстояния и бокового зазора, несовпадение средней плоскости червячного колеса и оси червяка, скрещивание осей), состояния смазочного материала.

Заедание возникает, как правило, на чугунных червячных колесах и безоловянистых (твердых алюминиевых) бронзовых венцах. Разрушение проявляется в переносе частиц бронзы на поверхность стального червяка и постепенном их приваривании к нему. Это приводит к изменению геометрии зацепления и прогрессированию процесса. Если причина заедания не устранена, частицы бронзы отрываются от поверхности червяка и дальнейшим развитием такого дефекта становится задир поверхности зубьев червячного колеса, приводящий к катастрофически нарастающему износу и последующему разрушению зубьев.

На заключительном этапе сборки комплексную оценку ее точности ведут по показателю пятна контакта, визуально контролируя его положение на периферии зуба. Оценивают этот параметр на поверхности зубьев червячного колеса путем прокручивания передачи после нанесения краски на боковые поверхности витков

червяка. Несмотря на очевидную наглядность и простоту этого метода, он обладает существенными недостатками, связанными с низкой точностью и достоверностью результатов, а также низкой производительностью.

Так, например, реальная величина пятна контакта существенным образом зависит от вязкости краски, размера зерен ее пигментной фракции. Другим недостатком метода является субъективность оценки результатов контроля оператором. Известно, что пятно контакта часто представляет собой не сплошную, а разомкнутую совокупность следов, в связи с чем оценка их суммарной площади относительно общей площади активной боковой поверхности зубьев, проводимая оператором визуально, крайне приблизительна. Кроме того, величина и форма пятна контакта отличаются для различных пар зубьев и витков ведущего и ведомого звеньев. В этой связи мгновенная величина пятна контакта даже для одного и того же зуба колеса является непостоянной и зависит как от точности боковой поверхности сопрягаемого витка, так и от погрешностей расположения осей колес в пространстве. Таким образом, оценка оператором пятна контакта червячной передачи всегда является некоторой субъективно усредненной по совокупности зубьев оценкой.

Производительность метода также низка. Так, использование краски, если результат не достигнут, подразумевает ее удаление с поверхностей зубьев и витков, затем дальнейшую регулировку передачи, повторное нанесение краски, оценку пятна контакта и т.д. до достижения положительного результата. Такая последовательность не только неудобна с позиции затрат времени, но и ухудшает санитарные условия на сборочной операции.

Приведенные обстоятельства показывают, что используемые методы контроля обладают низкой достоверностью, в связи с чем предлагается оценивать точность сборки по другим критериям, связанным с компьютерным анализом кинематических погрешностей, характеризующих в том числе условия контакта колес.

Известно, что вращательное движение в зубчатой передаче передается от ведущего колеса к ведомому рабочими поверхностями зубьев. Наличие местных дефектов на этих поверхностях, отклонения формы зубьев от номинального профиля, а также погрешности изготовления деталей и сборки передач будут проявляться на графике кривой кинематической погрешности в виде положительных или отрицательных отклонений, периодически, с различной частотой и амплитудой повторяющихся в течение оборота ведомого вала. В этой связи сигнал кинематической погрешности и ее амплитудно-частотный спектр могут использоваться для оценки точности сборки и управления этим процессом [2].

Весьма полезной для решения многих практических задач является процедура цифровой фильтрации (исключения) отдельных гармонических составляющих из записи исходной кинематической погрешности. Такая фильтрация может быть реализована по формуле

$$F'(\varphi) = F(\varphi) - \sum_{k=i}^{k=j} A_k \cos(k\varphi + \varphi_k),$$

где  $F(\varphi)$  и  $F'(\varphi)$  - функции кинематической погрешности (исходная и после фильтрации);  $\varphi$  - угол поворота ведомого вала редуктора;  $A_k$  и  $\varphi_k$  - амплитуда и фаза  $k$ -й гармонической составляющей кинематической погрешности, полученные путем разложения исходной функции в ряд Фурье;  $[i; j]$  - диапазон исключенных гармонических составляющих.

Примером использования цифровой фильтрации является выделение так называемой зубцовой составляющей, т.е. части кинематической погрешности, из которой исключены низкочастотные составляющие, соответствующие накопленной погрешности шага передачи. Так, на рис. 1 показаны кинематическая погрешность (рис. 1а), ее зубцовая составляющая (рис. 1б) и амплитудно-частотный спектр (рис. 1в) для передачи, образцово собранной в соответствии с техническими требованиями, полученные с устройства сбора данных [2]. Уровень шума передачи также соот-

ветствовал техническим условиям и составлял 64 дБ. Здесь и далее по вертикальной оси отложены ординаты кинематической погрешности или амплитуды спектральных составляющих в угловых минутах, по горизонтальной - номер отсчета в пределах оборота ведомого вала или номер соответствующей гармоники.

Видно, что практически все основные отклонения сигнала расположены в пределах интервала  $\pm 3\text{-}4$  угл. мин, а спектральные составляющие имеют амплитуды, не превышающие 1 угл. мин, что свидетельствует о достаточно высокой плавности передачи.

Как правило, наличие множественных дефектов, связанных с заеданием, приводит к возникновению повышенного износа червячного колеса и появлению на поверхности его зубьев многочисленных следов от сопряженного витка с приваренными к его поверхности локальными дефектами. Так, на рис. 2 показано червячное колесо редуктора с нарушением точности сборки и начавшимся в процессе приработки интенсивным износом зубьев (с возникновением на их поверхности рисок в форме дуг окружности).

Наличие таких местных дефектов приводит к усилению или возникновению в спектре кинематической погрешности спектральных составляющих, кратных количеству зубьев ведомого колеса [3]. Кроме того, усиливаются также высокочастотные составляющие спектра, тесным образом коррелирующие с величиной пятна контакта. Очевидно, что наличие местных дефектов на поверхности зубьев приводит к разрыву мгновенного пятна контакта в соответствующих точках, причем такое взаимодействие происходит кратно количеству локальных дефектов (например рисок). Так, в работе [4] показано, что изменение мгновенной точки контакта активных боковых поверхностей зубьев, происходящее многократно за цикл пересопряжения двух зубьев, должно приводить к появлению в спектре кинематической погрешности частот, многократно превышающих зубцовую частоту. В этой связи контакт зубьев может характеризоваться как показатель «плавности второго порядка»

для высокочастотных составляющих кинематической погрешности с номерами

$k \geq z_2$ , где  $z_2$  - число зубьев ведомого колеса.

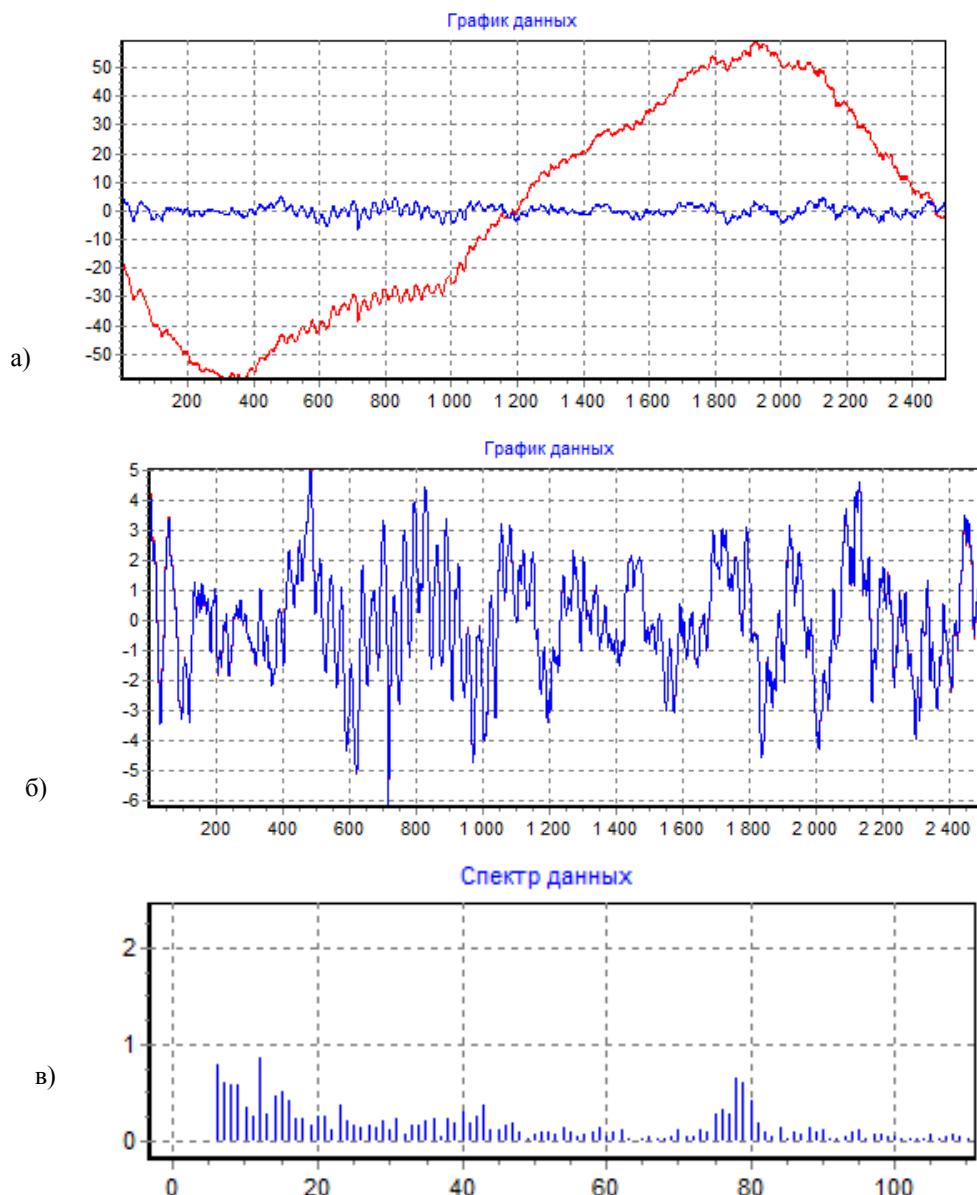


Рис. 1. Кинематическая погрешность, зубцовая составляющая и ее амплитудно-частотный спектр для образцовой передачи

Данное обстоятельство оказывается справедливым для всех типов зубчатых передач и подтверждается как результата-

ми трехмерного моделирования работы передач, так и результатами экспериментальных исследований.



Рис. 2. Прогрессирующий износ червячного колеса с возникновением рисок

Так, по результатам исследований восьмидесяти семи конических пар в условиях РУП «Минский тракторный завод» было установлено [2], что величина сум-

марного пятна контакта тесно коррелирует со средней геометрической величиной высокочастотных гармоник кинематической погрешности (рис. 3).

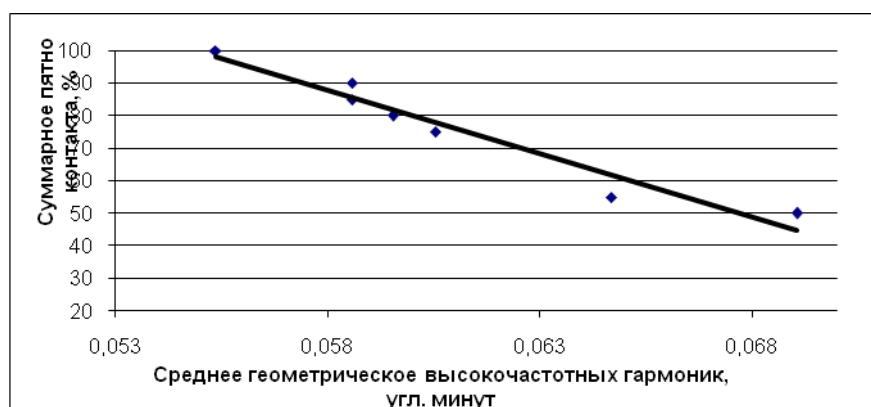


Рис. 3. Зависимость суммарного пятна контакта от среднего геометрического высокочастотных гармоник кинематической погрешности

Зависимость величины суммарного пятна контакта от среднего геометрического высокочастотных гармоник кинематической погрешности аппроксимируется линейной зависимостью с коэффициентом корреляции, равным 0,97:

$$PK_{\%}(N) = 313 - 3887 A'_{\sigma},$$

$$\text{где } A'_{\sigma} = 2 \sqrt{\frac{\sum_{i=k}^n A_i^2}{n}}, \text{ причем } A_i > \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n A_j.$$

В работе [4] предлагается ввести оценку условий контакта в зацеплении, не

зависящую от типа передач и определяемую статистическими (корреляционными) связями. На основе такой статистической зависимости величина среднего геометрического высокочастотных гармоник в угловых минутах может быть оценена для различных степеней  $N$  полноты контакта следующим образом:

$$PK(N) = 0,05' \cdot 1,26^{N-4}.$$

Это позволяет свести ее определение к анализу кинематической погрешности передачи в сборе и не учитывать конструктивные особенности конкретных передач.

Указанные предположения прошли проверку на червячных передачах в условиях ОАО «Могилевлифтмаш» с исполь-

зованием разработанной на кафедре «Технология машиностроения» Белорусско-Российского университета компьютерной системы для управления процессом сборки (рис. 4).

Она содержит: нагружающее устройство маятникового типа; преобразователь угловых перемещений типа ВЕ-178А, обеспечивающий запись кинематической

погрешности редуктора с дискретностью, соответствующей 2500 отсчетов за оборот ведомого вала; устройство сбора данных, подключаемое к портам компьютера; программный комплекс для управления процессом сборки данных и математической обработки сигнала кинематической погрешности.



Рис. 4. Компьютерная система для управления сборкой червячных передач

Установлено, что передачи, имеющие нарушения требований сборки, отличаются заметными высокочастотными составляющими спектра, имеют повышенные значения дисперсии даже в начале приработки, когда процессы заедания еще не начали прогрессировать. Очевидно, что нарушение условий контакта при сборке вызывает изменение геометрии зацепления, что приводит к изменению условий скольжения в паре и коррелирующему с ними снижению плавности хода и росту

высокочастотных составляющих кинематической погрешности.

Очень часто заедание сопровождается вибрациями, нехарактерными звуками: обычно малошумная передача начинает работать с периодически проявляющимся скрежетом, рокотом.

На рис. 5 представлены зубцовая составляющая и ее спектр для передачи, отличающейся неравномерным шумом при работе.

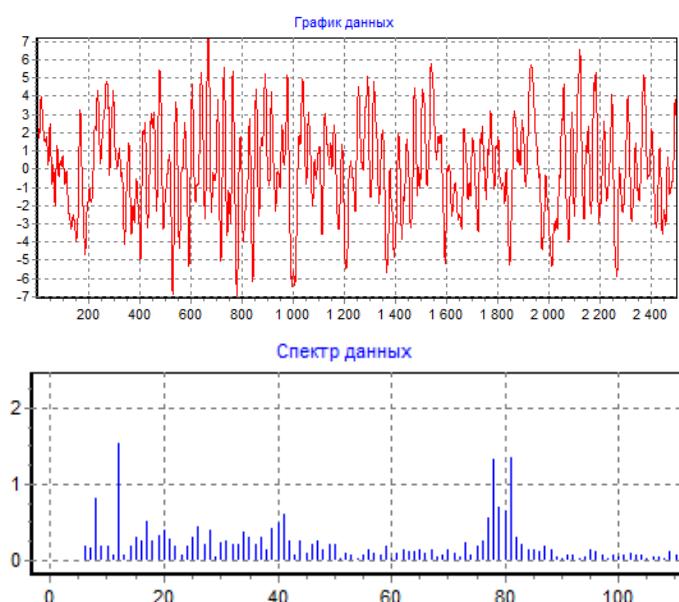


Рис. 5. Зубцовая составляющая и ее спектр для передачи с повышенными шумовыми характеристиками

Вероятным источником такого шума могут быть процессы скольжения червяка по рискам червячного колеса (рис. 2). Видно, что общая дисперсия сигнала заметно выше, чем на рис. 1. Также заметно увеличение высокочастотных спектральных составляющих.

На рис. 6 представлены те же характеристики для передачи с повышенным уровнем вибраций, носящим периодический характер.

Видно, что кроме заметного увеличения амплитуд гармонических составляющих на зубцовой частоте и их низкой ве-

личины в высокочастотной области в сигнале кинематической погрешности присутствует мощный колебательный пакет длительностью около  $\frac{1}{4}$  периода оборота ведомого вала. Такой сигнал может быть признаком задирных явлений в ограниченной области червячного колеса.

Необходимо также отметить, что кинематический контроль, по-видимому, не в состоянии выявить колебания механизма, частота которых заметно превосходит роторные частоты механизма, т.е. частоты, близкие к частотам вращения валов редуктора.

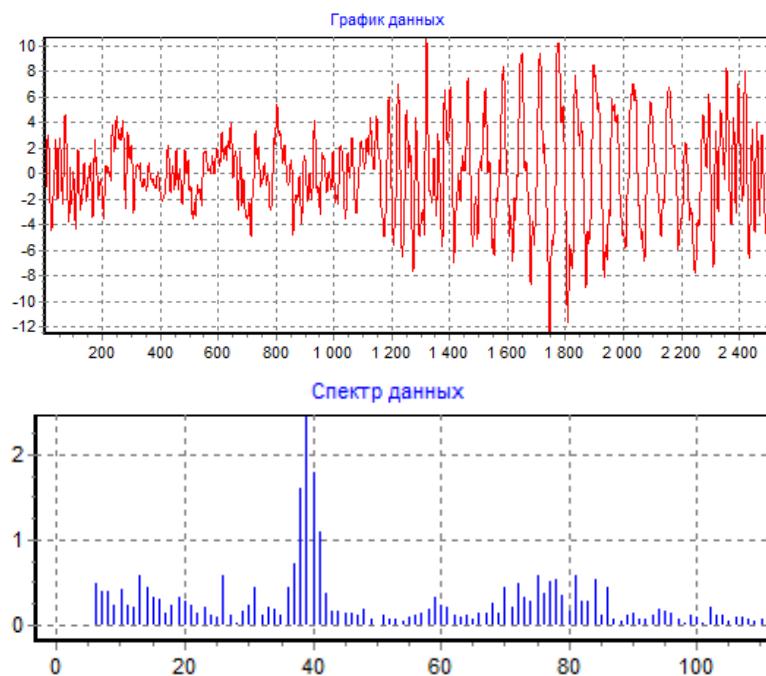


Рис. 6. Зубцовая составляющая и ее спектр для передачи с повышенным уровнем вибраций

На рис. 7 показаны зубцовая составляющая и спектр для передачи, отличающейся высоким уровнем шума (72 дБ), по которому она и была отбракована. Качество сборки элементов зацепления такой передачи оказалось нормальным, а причиной шума явились некачественные подшипники. Несколько повышенные амплитуды имеют среднечастотные составляющие, однако они незначительно коррелируют с условиями контакта. Высокочастотные составляющие имеют весьма низкие значения. Данное обстоятельство позволяет рекомендовать контроль уровня шума в дополнение к кинематическому контролю зацепления.

Было также установлено, что при изготовлении редуктора на имеющемся оборудовании технологическими мерами может быть достигнута четвертая-пятая степень точности червячного колеса и червяка. Однако передачи в сборе не могут обеспечить кинематическую точность и плавность выше шестой степени, что связано с погрешностями изготовления базовых отверстий в корпусах, погрешностями регулирования при сборке, а также с использованием не всегда качественных подшипников с увеличенными радиальными зазорами.

Кинематическая погрешность может выступать также в качестве ценного диагностического признака при контроле мон-

тажа лифтовых лебедок. При производстве редукторов для лебедок пассажирских лифтов ГП630 строгим требованием является обеспечение плавности работы редуктора и, как следствие, плавности перемещения кабины лифта.

При перемещении нагруженной кабины лифта (рис. 8а, б) кинематическая

точность редуктора несколько увеличивается по сравнению с ненагруженным состоянием (рис. 8в), но при этом ухудшается плавность работы. Компьютерной системой были выявлены локальные дефекты, представленные на графиках в форме скачков, выбросов.

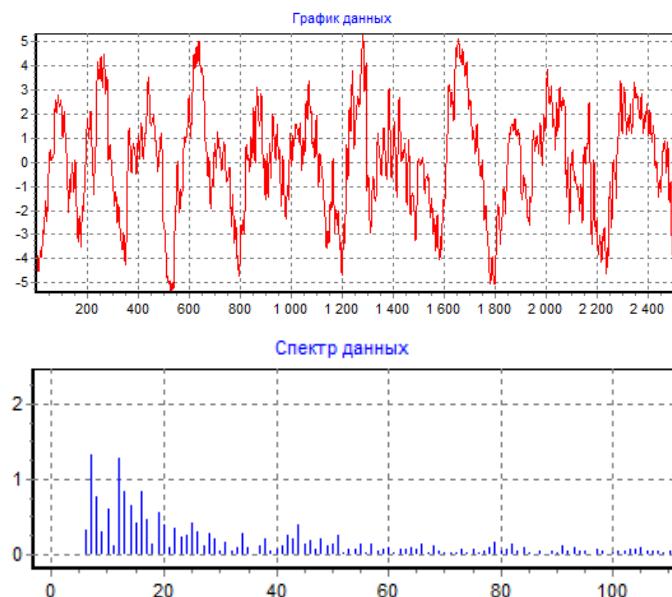


Рис. 7. Зубцовая составляющая и ее спектр для передачи с повышенным уровнем шума подшипников

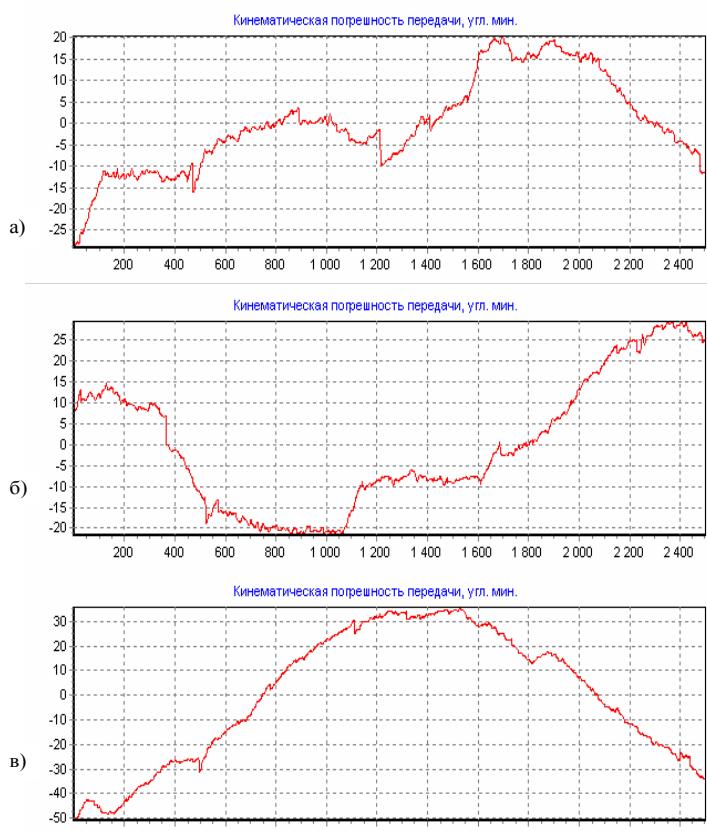


Рис. 8. Функции кинематической погрешности редуктора лебедки лифта, перемещающей кабину под нагрузкой (а, б) и без нагрузки (в)

На основе анализа большого количества записей кинематической погрешности было установлено, что такие дефекты характеризуются нерегулярностью в своем проявлении и поэтому не связаны с наличием каких-либо дефектов как на ведущем, так и на ведомом звеньях редуктора. Причиной местных выбросов на графиках кинематической погрешности редуктора является наличие стыков в направляющих кабины лифта.

Результаты, полученные при использовании компьютерной системы для контроля качества сборки червячных передач на основе спектрального анализа их кинематической погрешности, позволяют сделать ряд выводов:

1. Кинематическая погрешность червячной передачи и ее амплитудно-частотный спектр представляют собой ценные контрольно-диагностические признаки, позволяющие дать комплексную оценку качества сборки передач и заменить применяющийся в настоящее время метод контроля пятна контакта с нанесением краски на объективный метод, использующий численные критерии качества сборки.

2. Качество сборки червячных передач тесным образом коррелирует с ампли-

тудами зубцовой и кратной спектральных составляющих кинематической погрешности, а также со средним геометрическим высокочастотных составляющих спектра и дисперсией сигнала.

3. Технологические меры обеспечения плавности работы редуктора не позволяют добиться необходимой точности, если на этапе сборки не будет вестись активный контроль качества сборки зацепления передачи с учетом широкой вариации радиальных зазоров подшипников, а также их входной контроль.

Использование аппаратно-программного комплекса позволяет в этом случае повысить точность сборки лебедок лифта до 1-2 степени по норме плавности.

4. Контроль качества сборки червячных редукторов должен включать процедуру оценки как качества сборки элементов зацепления на основе кинематического контроля, а также процедуру контроля уровня шума и/или вибраций для диагностики подшипниковых опор.

5. Для обеспечения плавности перемещения кабины лифта рекомендуется также контролировать на этапе его монтажа отсутствие разновысотности направляющих в стыках.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mashnev, M.M. Theory of Mechanisms and Machine Parts / M.M. Mashnev, E.A. Kraskovsky, P.A. Lebedev. - L.: Machinery. Leningrad Branch, 1980. - pp. 512.
2. Pashkevich, V.M. Increase of accuracy of mechanical transmission based on computer simulation and use of artificial intelligence techniques: monograph / V.M. Pashkevich [et al.]. - Mogilev: Belarusian-Russia University, 2011. - pp. 139.
3. Pashkevich, V.M. Detection of local defects in gearing / V.M. Pashkevich, D.A. Zabelin // Bulletin of Belarusian-Russian University. – Mogilev, 2006. – No.1. – pp. 37-47.
4. Pashkevich, V.M. Method of associative estimation of standards for assembled gearing accuracy / V.M. Pashkevich // Bulletin of Belarusian-Russian University, 2009. – No.2. – pp. 115-120.
5. Mashnev, M.M. Theory of Mechanisms, Machinery and Machine Parts / M.M. Mashnev, E.A. Kraskovsky, P.A. Lebedev. – L.: Mechanical Engineering. Leningrad Branch, 1980. – pp. 512.
6. Pashkevich, V.M. Mechanical Gear Accuracy Increase Based on Computer Simulation and Use of Artificial Intelligence Techniques: monograph / V.M. Pashkevich [et al.]. – Mogilev: Belarusian-Russia University, 2011. – pp. 139.
7. Pashkevich, V.M. Detection of local defects in gearing / V.M. Pashkevich, D.A. Zabelin // Bulletin of Belarusian-Russian University. – Mogilev, 2006. – No.1. – pp. 37-47.
8. Pashkevich, V.M. Method of associative estimation of standards for assembled gearing accuracy / V.M. Pashkevich // Bulletin of Belarusian-Russian University, 2009. – No.2. – pp. 115-120.

*Статья поступила в редакцию 20.11.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Могилевского государственного  
Университета продовольствия  
Акулич А.В.*

**Сведения об авторах:**

**Пашкевич Виктор Михайлович**, д.т.н., проректор по научной работе Белорусско-Российского университета, тел.: +375 222 250905, e-mail: [pvm@bk.ru](mailto:pvm@bk.ru).

**Pashkevich Victor Makhailovich**, D. Eng., Pro-Rector for Scientific Work, Belarusian-Russian University, e-mail: [pvm@bk.ru](mailto:pvm@bk.ru).

УДК 621.791

DOI: 10.12737/article\_5a795ff8cf8035.78116237

А.Л. Забелин, Д.Н. Савинов

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНО-ГИБРИДНОЙ СВАРКИ В ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЕ

Рассмотрена технология гибридной сварки, а также возможность ее применения в промышленных условиях. Показаны преимущества и недостатки данного процесса. Проведено сравнение режимов сварки и характеристик сварного шва на примере лазерно-дуговой сварки и сварки под слоем флюса. Сделаны выводы о возможности и целесо-

образности применения лазерно-гибридной сварки в условиях крупносерийного и массового производства.

**Ключевые слова:** лазерно-гибридная сварка, сварка под слоем флюса, тепловложение, разделка кромок, поворотный круг, формирование сварного шва.

A.L. Zabelin, D.N. Savinov

### ANALYSIS OF LASER-HYBRID WELDING IN PRODUCTION ENVIRONMENT

The technology of hybrid-arc welding and also its application possibilities under industrial conditions are considered. The advantages and drawbacks of this process are shown. The comparison of welding modes and weld seam characteristics by the example of laser-arc welding and hidden-arc welding is carried out. The

conclusions on a possibility and purposefulness of the laser-hybrid welding application under conditions of large-scale manufacture and repetition work are drawn.

**Key words:** laser-hybrid welding, hidden-arc welding, heat transfer, grooving, turn-table, weld seam formation.

Основной задачей при изготовлении сварных конструкций в машиностроении является снижение сварочных деформаций при сварке деталей больших толщин. При выполнении многопроходных швов происходит большое тепловложение в сварочную ванну, за счет чего происходит коробление изделия. Для предотвращения этого приходится выполнять сварку в определенной последовательности с предварительным подогревом свариваемых деталей. Это влечет за собой снижение производительности сварочного процесса и увеличение себестоимости изделия.

В настоящее время существуют способы сварки, позволяющие сваривать детали больших толщин с малым тепловложением в сварочную ванну и минимальным количеством проходов. Одним из таких методов является лазерно-гибридная

сварка (ЛГС), в частности лазерно-дуговая (ЛДС).

Процесс гибридной сварки заключается в том, что два источника (лазерный луч и дуга) воздействуют одновременно на одну сварочную ванну, при этом дуговой разряд стабилизируется за счёт плазменного факела, образованного при взаимодействии лазерного излучения с материалом. Лазерный луч глубоко проникает в материал и испаряет его, что способствует ликвидации сварочных деформаций и напряжений. При сварке плавящимся электродом в общую сварочную ванну вводится присадочный материал, который заполняет образованную лазерным лучом воронку и обеспечивает надежное соединение кромок [1; 2]. В результате получаются сварные швы с глубоким проплавлением и высокой прочностью. Схема ЛДС изображена на рис. 1.

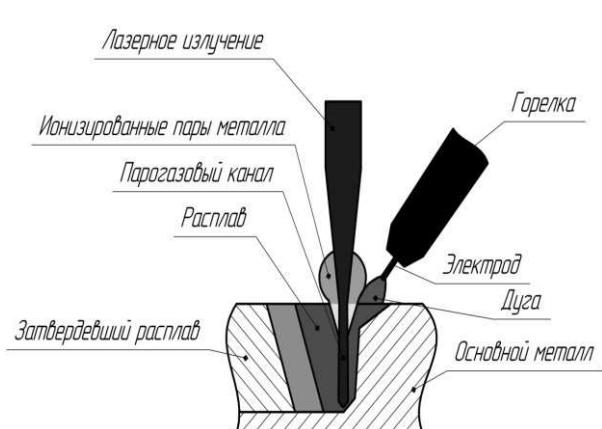


Рис. 1. Принципиальная схема ЛДС

В настоящее время известно множество способов применения лазерно-дуговой технологии в промышленности, начиная от использования вольфрамового электрода при сварке неплавящимся электродом и заканчивая сваркой под слоем флюса (при наличии плавящегося электрода). Кроме того, этот процесс классифицируется по воздействию на сварочную ванну. Источники могут находиться как с одной стороны (гибридная технология), так и с разных сторон от сварочной ванны (комбинированная технология).

Рассмотрим применение ЛДС на примере поворотного круга (рис. 2) автогрейдера производства ЗАО «Брянский Арсенал».

Соединение кольца и обода осуществляется тавровым соединением. Обе

детали имеют толщину 25 мм. Для выполнения сварного соединения дуговой сваркой под слоем флюса необходимо производить сварку в несколько проходов с большим диаметром сварочной проволоки и большими значениями сварочного тока. Флюс в расплавленном состоянии очень токсичен, и его остатки нужно убирать. Но основным недостатком данной технологии является трудоемкость слесарной операции по зачистке шва от шлаковой корки. Лазерно-дуговая сварка позволяет выполнить более глубокое проплавление при значительно меньшем значении сварочного тока без выполнения разделки кромки. Ориентировочные режимы представлены в таблице, а условный внешний вид сварного соединения - на рис. 3.

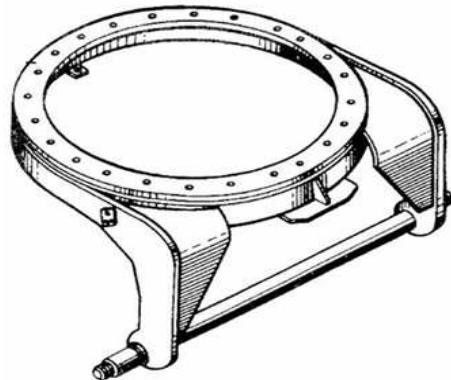
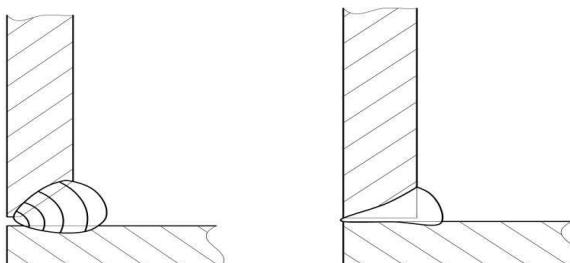


Рис. 2. Поворотный круг автогрейдера производства ЗАО «Брянский Арсенал»

#### Режимы автоматической сварки углеродистых и низколегированных сталей

Метод сварки	Значение сварочного тока, А
Дуговая сварка под слоем флюса	650-700
Лазерно-дуговая сварка	250-300



Сварка под слоем флюса / Лазерно-дуговая сварка

Рис. 3. Внешний вид проплавления

Кроме того, гибридная технология позволяет выполнять сварку с большими скоростями, чем сварка в защитных газах ( $V_d=1,8$  м/мин;  $V_r=1,5$  м/мин). При этом процесс протекает значительно стабильнее и с более высоким КПД по сравнению с дуговой сваркой. Немаловажным аспектом

также являются требования к подготовке кромок деталей. ЛДС позволяет существенно снизить требования к зазорам и точности сборки по сравнению с дуговой сваркой [3]. На рис. 4 представлено формирование сварного шва в зависимости от скорости сварки при заданных параметрах.

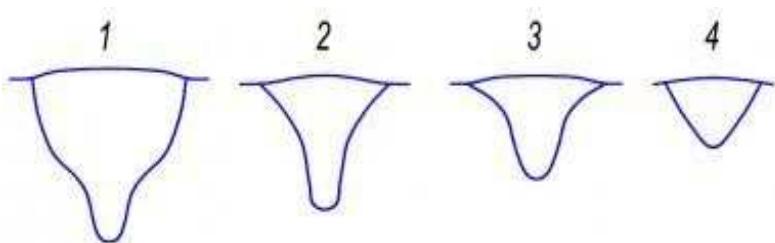


Рис. 4. Изменение геометрии шва и глубины проплавления в зависимости от скорости сварки ( $P=900$  Вт;  $I=50$  А – const): 1 –  $V_{cb}=21,3$  мм/с; 2 –  $V_{cb}=40$  мм/с; 3 –  $V_{cb}=62$  мм/с; 4 –  $V_{cb}=100$  мм/с

Однако, несмотря на свои преимущества, лазерно-дуговая сварка имеет и ряд недостатков. Основным из них является экономический аспект. Для выполнения лазерно-дугового процесса необходимы источник лазерного излучения (как правило, это иттербийевые волоконные лазеры), устройство для фокусировки излучения, а также источники питания для дуги и подающий механизм. Кроме того, для проведения данного процесса требуется высокая квалификация обслуживающего персонала, так как необходимо правильно подобрать ряд параметров: лазерную мощность, относительное расположение сфокусиро-

ванного лазерного луча и дуги, скорость сварки, угол наклона электрода и др. [3; 4].

В результате анализа применения лазерно-гибридной сварки в производстве на примере поворотного круга автогрейдера производства ЗАО «Брянский Арсенал» можно сделать вывод, что гибридную технологию целесообразно и экономически выгодно применять в условиях крупносерийного и массового производства, так как она позволяет изготавливать изделия высокого качества с большей производительностью и значительно меньшими трудозатратами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туричин, Г.А. Перспективы внедрения лазерно-дугового процесса для сварки металлов больших толщин / Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, В.В. Сомонов, М.В. Кузнецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. «Наука и образование». - 2010. - № 4 (110). - С. 181-187.
2. Туричин, Г. А. Технология гибридной лазерно-дуговой сварки: учеб. пособие / Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, М.В. Кузнецов. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. - 48 с.
3. Григорьянц, А.Г. Гибридные технологии лазерной сварки: учеб. пособие / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.М. Чирков. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 54 с.
4. Кривцун, И.В. Гибридные лазерно-дуговые процессы сварки и обработки материалов: дис. ... д-ра техн. наук / И.В. Кривцун. - Киев, 2002. - 393 с.

1. Turichin, G.A. Outlooks of laser-arc welding introduction for thick metal welding / G.A. Turichin, I.A. Tsybulsky, V.V. Somonov, M.V. Kuznetsov // *Scientific-technical Gazette of S-PbSU. Series "Science and Education".* – 2010. – No.4 (110). – pp. 181-187.
2. Turichin, G.A. *Technology of Hybrid Laser-arc Welding*: manual / G.A. Turichin, I.A. Tsybulsky, M.V. Kuznetsov. – S-Pb.: Polytechnics Publishers, 2015. – pp. 48.
3. Grigoriyants, A.G. *Hybrid Technologies of Laser Welding*: manual / A.G. Grigoriyants, I.N. Shiganov, A.M. Chirkov. – M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2004. – pp. 54.
4. Krivtsun, I.V. *Hybrid Laser-arc Welding Processes and Material Processing*: thesis for D. Eng. degree / I.V. Krivtsun. – Kiev, 2002. – pp. 393.

*Статья поступила в редакцию 10.12.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Макаренко К.В.*

#### **Сведения об авторах:**

**Забелин Алексей Леонидович**, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, e-mail: [swordfish\\_74@mail.ru](mailto:swordfish_74@mail.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).

**Савинов Денис Николаевич**, магистрант кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, e-mail: [dan.sawinov2011@yandex.ru](mailto:dan.sawinov2011@yandex.ru).

**Savinov Denis Vasilievich**, Master's degree post graduate student of the Dep. “Mechanical Engineering and Material Science”, Bryansk State Technical University, e-mail: [dan.sawinov2011@yandex.ru](mailto:dan.sawinov2011@yandex.ru).

УДК 621.9:62-187:621.9.02-229  
 DOI: 10.12737/article\_5a795ff91c1e31.61293206

О.Ю. Казакова, Л.Б. Гаспарова, А.А. Казаков

## ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОПРАВКИ НА ЕЕ ПОЛОЖЕНИЕ В ШПИНДЕЛЕ СТАНКА

Представлены результаты исследования точности и угловой жесткости подсистемы «шпиндель - инструмент» с использованием конечноэлементной модели с учетом погрешностей базирующего конуса инструментальных оправок и конструктивных особенностей. Предложены рекомендации по возможно-

сти использования (в случае технологической необходимости) пояска на конической части оправки.

**Ключевые слова:** станок, шпиндель, инструментальная оправка, конечноэлементная модель, погрешность, точность, угловая жесткость.

O.Yu. Kazakova, L.B. Gasparova, A.A. Kazakov

### **IMPACT OF CUTTING FORCE RADIAL COMPONENT AND TOOL MANDREL GEOMETRICAL PARAMETERS UPON ITS POSITION IN MACHINE SPINDLE**

The investigation results of accuracy and angular rigidity of the “spindle-tool” subsystem with the use of a finite-element model taking into account errors of the basing cone of mandrels and design peculiarities are presented. A number of experiments allowed drawing the following conclusions:

1. The presence of the band with the width of 5... 10 mm slightly affects mandrel axial movements. A band width increase (up to 25 mm) results in the increase of axial movements. In such a way, in case of technological necessity of band manufacturing a band width should not exceed 5...10mm, it may be located

in the middle of the tapered surface or moved in the direction of a larger diameter.

2. The angular rigidity of a tapered joint has a non-linear character of changes caused by the action of the cutting force radial component within the limits up to 1000 N. At the further force increase up to 2000 N the angular rigidity of the “spindle – tool” subsystem increases according to the linear law. At the presence of angular errors obtained by the decrease of diameters D and d the rigidity decreases by ~ 4 times.

**Key words:** machine, spindle, mandrel, finite-element model, error, accuracy, angular rigidity.

### **Введение**

Точность осевого расположения инструментальной оправки в отверстии шпинделя носит случайный характер, поскольку оправка и конусное отверстие шпинделя могут иметь погрешности формы, образовавшиеся при изготовлении или в результате износа поверхностей.

Учесть возможные погрешности формы при аналитических исследованиях

контактирования в подсистеме «шпиндель - инструмент» достаточно трудно и не всегда возможно. В связи с этим возникает необходимость использования численных методов для решения задач, связанных с рассмотрением процессов в подсистеме «шпиндель - инструмент».

### **Влияние геометрических параметров инструментальной оправки на ее осевое расположение в шпинделе станка**

Для оценки точности осевого расположения инструментальной оправки и угловой жесткости подсистемы «шпиндель - инструмент» программный продукт конечноэлементного анализа *Ansys* дает возможность моделировать эту подсистему при двух процессах: закрепления и эксплуатации.

Влияние погрешностей формы на точность осевого расположения при за-

креплении инструмента в шпинделе было рассмотрено в работах [1; 2].

Предложенная ранее конечноэлементная модель позволила оценить влияние пояска на базирующую поверхности оправок на точность их осевого расположения в шпинделе.

Результаты расчета (рис. 1, табл. 1) подтвердили предположение, что оправки без пояска за счет большей контактной

площади имеют меньшие осевые перемещения при закреплении в отверстии шпин-

деля.



Рис. 1. График зависимости осевого перемещения оправки от разме-ра пояска вдоль образующей

Таблица 1

Осевое перемещение оправки с пояском при закреплении, мкм

Р <sub>зат</sub> , кН	Оправка без пояска	Размер пояска, мм		
		0,2×5	0,2×10	0,2×25
1	0,6	0,6	0,6	0,8
2	1,1	1,2	1,2	1,6
3	1,7	1,8	1,9	2,5
4	2,3	2,4	2,5	3,2
5	2,9	3	3,1	4,2

Наличие пояска шириной 5...10 мм незначительно сказывается на осевых перемещениях оправки.

При наличии пояска размером 0,2 × 25 мм осевые перемещения увеличиваются

на 30% (рис. 1- 3). Оценено также и положение пояска на конической части оправки. Осевые перемещения оправки увеличиваются при смещении пояска к малому диаметру.



Рис. 2. График влияния усилия затяжки на осевые перемещения оправки при различном расположении пояска размером 0,2×25 мм

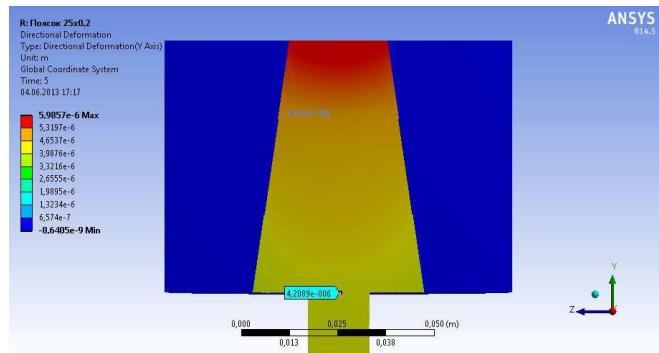


Рис. 3. Осевые перемещения оправки при наличии пояска размером 0,2×25 мм

## Влияние радиальной составляющей силы резания на положение оправки в шпинделе станка

С целью оценки влияния радиальной составляющей силы резания на условия закрепления инструмента в шпинделе моделировалось действие на закрепленную оправку радиальной силы на конце оправки, имитирующей радиальную составляющую силы резания (рис. 4).

Расчет проводился для оправки 40 при следующих исходных данных: усилие затяжки - 5000 Н; радиальная составляющая силы резания - 500, 1000, 2000 Н. Указанные значения радиальных сил соответствуют рассчитанным для чистовых режимов резания и подтверждаются данными работы [3].

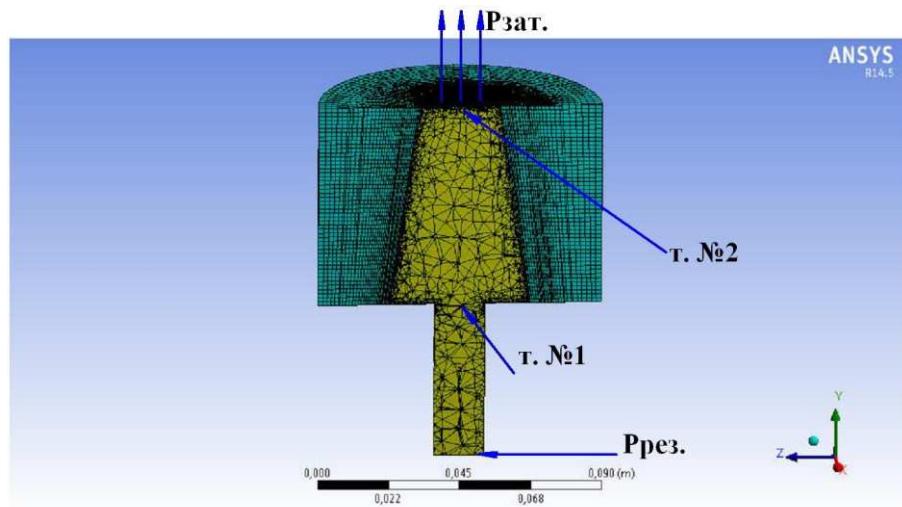


Рис. 4. Конечноэлементная модель подсистемы «шпиндель - инструмент»

Для оценки полученных расчетных данных в пакете *Ansys* использовались результаты экспериментов, проведенных на экспериментальном стенде [2].

Разработанная КЭ модель была использована для анализа процессов в подсистеме «шпиндель - инструмент» при наличии отклонения от прямолинейности (выпуклость) образующей конуса инструментальной оправки и угловых погрешностей.

Погрешности моделировались в допустимых пределах (при изготовлении по 7-й степени точности).

Максимальные радиальные перемещения (при  $P_{\text{зат}} = 5000 \text{ Н}$ ,  $P_{\text{рез}} = 2000 \text{ Н}$ ) наблюдались у оправки при наличии угловой погрешности по  $D$  «-» при изготовлении по 7-й степени точности. Величина данных перемещений составляла 9 мкм, что превышало значения перемещений оправки, изготовленной по номинальным размерам, в 4,5 раза.

Наличие угловой погрешности по  $D$  и  $d$  «-» (по 7-й ст. т.) существенно отражается на картине упругих угловых деформаций и угловой жесткости в подсистеме «шпиндель - инструмент» (рис. 5, табл. 2).

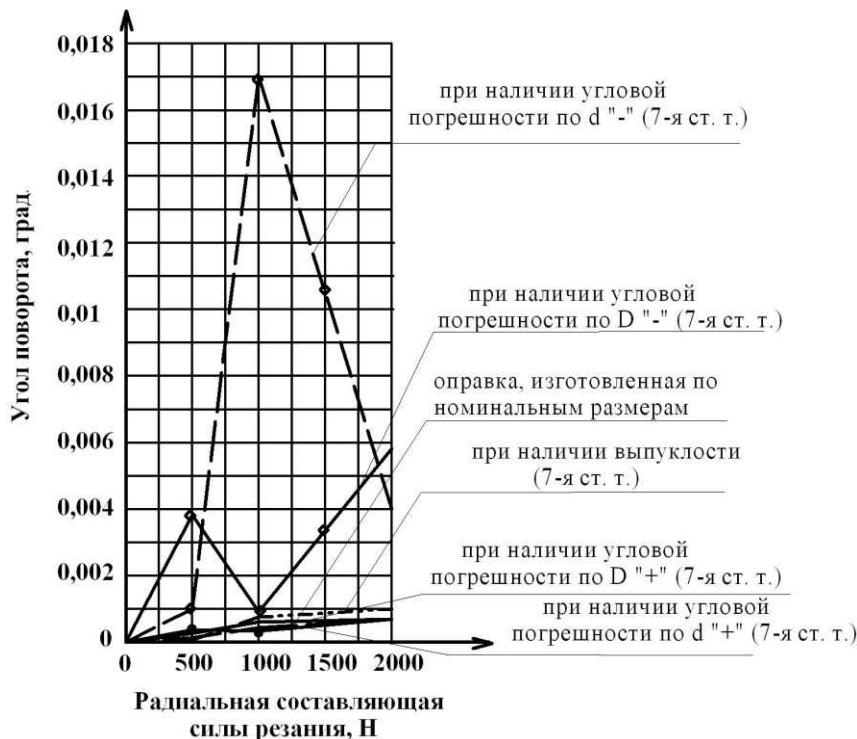


Рис. 5. Влияние угловых погрешностей и отклонения от прямолинейности (выпуклость) направляющей конуса на упругие угловые деформации в подсистеме «шпиндель - инструмент»

Таблица 2

Значения угловой жесткости подсистемы «шпиндель - инструмент», Н/рад

$P_{рез}, \text{Н}$	Оправка, из- готовленная по номиналь- ным разме- рам	Наличие по- грешности по $D^{(+)}$ по 7-й ст. т.	Наличие по- грешности по $D^{(-)}$ по 7-й ст. т.	Наличие по- грешности по $d^{(+)}$ по 7-й ст. т.	Наличие по- грешности по $d^{(-)}$ по 7-й ст. т.	Наличие по- грешности по 7-й ст. т.
500	$1,1 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^8$	$7,3 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$
1000	$1,1 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^8$	$7,6 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^8$	$3,4 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^8$
2000	$1,8 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^8$	$2,7 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^8$

Результаты расчета с использованием пакета конечноэлементного анализа *Ansys* позволили сделать вывод о несущественном влиянии угловых погрешностей конуса оправки, полученных при отклонении обоих диаметров в положительную сторону, на жесткость подсистемы «шпиндель - инструмент» в области сил резания (1000...2000 Н). Приведенные выводы хорошо согласуются с данными работы [3].

Угловая жесткость подсистемы «шпиндель - инструмент» при наличии угловых погрешностей оправки ( $D^{(+)}$  и  $d^{(+)}$ ) с увеличением радиальной составляющей силы резания практически не меняется и остается существенно ниже жесткости оправки, изготовленной по номинальным размерам (рис. 6).



Рис. 6. Жесткость оправок  
(все погрешности моделировались по 7-й степени точности)

## Заключение

Проведенный ряд экспериментов позволил сделать следующие выводы:

1. Оправка без пояска за счет большей контактной площади имеет меньшие осевые перемещения при закреплении. Наличие пояска шириной 5...10 мм незначительно сказывается на осевых перемещениях оправки.

Дальнейшее увеличение ширины пояска (до 25 мм) приводит к увеличению осевых перемещений на ~ 30 % по сравнению с оправкой, изготовленной по номинальным размерам. При смещении данного пояска из центральной части в сторону меньшего диаметра осевые перемещения еще более увеличиваются. Таким образом, в случае технологической необхо-

димости изготовления пояска его ширина не должна превышать 5...10 мм, он может располагаться в средней части конической поверхности или быть смещен в сторону большего диаметра.

2. Угловая жесткость конического соединения имеет нелинейный характер изменения от действия радиальной составляющей силы резания в пределах до 1000 Н. При дальнейшем увеличении силы до 2000 Н угловая жесткость подсистемы «шпиндель - инструмент» увеличивается и имеет линейный характер изменения. При наличии угловых погрешностей, полученных уменьшением диаметров  $D$  и  $d$ , жесткость снижается в ~ 4 раза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казакова, О.Ю. Повышение точности при обработке заготовок на станках с ЧПУ / О.Ю. Казакова, В.И. Петрунин, А.А. Казаков // Наукоёмкие технологии в машиностроении. - 2016. - №2 (56). - С. 44-48.
2. Казакова, О.Ю. Повышение точности обработки на станках фрезерно-сверлильно-расточной
1. Kazakova, O.Yu. Accuracy increase at blank machining on NC machines / O.Yu. Kazakova, V.I. Petrunin, A.A. Kazakov // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.2 (56). – pp. 44-48.
2. Kazakova, O.Yu. Machining Accuracy Increase on Machines of Milling-Drilling-Boring Group at the

группы за счет минимизации погрешностей инструментальных систем: дис. ... канд. техн. наук / О.Ю. Казакова. - Самара, 2013. - 182 с.

3. Левина, З.М. Исследование жесткости конических соединений / З.М. Левина, А.А. Корниенко, А.Г. Бойм // Станки и инструмент. - 1973. - № 10. - С. 13-17.

Expense of Error Minimization in Tool Systems: thesis for Can. Eng. degree / O.Yu. Kazakova. – Samara, 2013. – pp. 182.

3. Levina, Z.M. Rigidity investigations in tapered joints / Z.M. Levina, A.A. Kornienko, A.G. Boim // *Machines and Tools*. – 1973. – No.10. – pp. 13-17.

Статья поступила в редколлегию 21.12.17.

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

#### Сведения об авторах:

**Казакова Ольга Юрьевна**, к.т.н., доцент Самарского государственного технического университета, тел. 89276526590; 8(846)2420697, e-mail: [kazakova8080@mail.ru](mailto:kazakova8080@mail.ru).

**Гаспарова Лана Багратовна**, к.пед.н., доцент Самарского государственного технического университета,

**Kazakova Olga Yurievna**, Can. Eng., Assistant Prof. of Samara State Technical University, e-mail: [kazakova8080@mail.ru](mailto:kazakova8080@mail.ru).

**Gasparova Lana Bagratovna**, Can. Pedagog., Assistant Prof. of Samara State Technical University, e-mail: [gasparova@mail.ru](mailto:gasparova@mail.ru).

ситета, тел. 89272606805; 8(846)2784414, e-mail: [gasparova@mail.ru](mailto:gasparova@mail.ru).

**Казаков Андрей Александрович**, студент Самарского государственного технического университета, тел. 89276012052, e-mail: [kazakova8080@mail.ru](mailto:kazakova8080@mail.ru).

**Kazakov Andrey Alexandrovich**, Student of Samara State Technical University, e-mail: [kazakova8080@mail.ru](mailto:kazakova8080@mail.ru).

УДК 621.795.2 (075.8)  
DOI: 10.12737/article\_5a795ff7927143.25462906

О.Б. Сильченко

## ПЛАСТИЧНОЕ МИКРОШЛИФОВАНИЕ - АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ СПОСОБ ОБРАБОТКИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Приведены методы обработки хрупких материалов. Сформулирована гипотеза о возможности шлифования хрупких материалов в режиме пластичности. Приведены условия получения безде-

фектного поверхностного слоя при определенных режимах микрошлифования.

**Ключевые слова:** хрупкое разрушение, пластическое течение, кристалл, микрошлифование.

O.B. Silchenko

### PLASTIC MICROGRINDING – ALTERNATIVE METHOD OF BRITTLE MATERIAL MACHINING

Methods for brittle material machining are shown. A hypothesis of brittle material grinding possibility in the mode of plasticity is formulated. The conditions of obtaining a defect-free surface layer at cer-

tain modes of microgrinding are shown.

**Key words:** brittle fracture, plastic flow, crystal, microgrinding.

Прогресс в ведущих отраслях промышленности России связан с созданием суперпрецзионного оборудования. Для развития суперпрецзионной техники в нашей стране необходимо проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок.

Обработка кристаллических материалов полупроводниковой техники (кремний, германий, сапфир, арсенид галия, фосфорид галия, арсенид индия, гранат, кварц и др.), а также кристаллических материалов ювелирной промышленности (природные и искусственные алмазы, изумруд, фионит и другие природные моно-кристаллы) делает необходимой разработку нанотехнологии и станочного суперпрецзионного оборудования.

Характерные для кристаллов и моно-кристаллов свойства, такие как высокая твердость и одновременно хрупкость, а также высокие требования, предъявляемые к качеству обработанной поверхности, точности размеров и формы, приводят к тому, что одним из важнейших перспективных способов окончательной обработки становится обработка алмазными кругами. Как показывает опыт обработки вышеуказанных материалов, наиболее эффективным является метод врезного шлифования. Вследствие твердости природных

и искусственных алмазов возникает проблема автоматического выбора режимов шлифования, так как шлифование выполняется кругом, содержащим зерна той же твердости, что и обрабатываемый материал.

Сложность при выборе режимов шлифования хрупких и сверхтвердых материалов заключается в том, что режимы обработки таких материалов должны находиться в определенных интервалах, ограничивающих область резания кристалла без хрупкого разрушения. Выход из этой области может привести к необратимым изменениям кристаллической решетки материала (сколам, вырывам и т.п.).

Создание суперпрецзионного оборудования, способного работать автоматически в режимах чернового резания, полирования, а также резания без хрупкого разрушения, является основным направлением в развитии современного станкостроения. Создание такого оборудования открывает широкие возможности для применения его в электронной, ювелирной и др. отраслях промышленности.

Последние достижения в повышении точности механической обработки открыли новые возможности обработки хрупких материалов.

Известно, что пластиически деформи-

рованная стружка образуется при механической обработке хрупких материалов, если съем материала достаточно мал (глубина резания менее 1 мкм) [1]. При этом условии формирование подобных пластичеки деформированных областей наблюдали на продуктах механической обработки разнообразных керамических материалов, стекол и кристаллов. На этом основании можно предположить, что пластическая деформация не связана с природой материала (хрупкий он или пластичный, твердый или мягкий, кристаллический или аморфный).

Шлифование хрупких материалов в условиях, при которых преобладающим путем удаления материала является вязкое разрушение, представляет собой новый технологический процесс, известный как шлифование в режиме пластичности.

В 1954 г. было сделано предположение о возможности шлифования хрупких материалов в режиме пластичности. Тогда было установлено, что при абразивном износе каменной соли доминирующим механизмом удаления материала является пластическое течение, а не хрупкое разрушение.

В 1975 г. благодаря совершенствованию прецизионных алмазных шлифовальных устройств удалось впервые получить воспроизводимое экспериментальное подтверждение протекания пластической деформации при шлифовании заготовок из хрупкого стекла.

Первое устройство, разработанное специально для того, чтобы использовать малые (0,2 мкм на один проход плоскошлифовального станка) поперечные подачи при шлифовании для повышения чистоты обработки, было создано при участии автора работы. На этой установке было осуществлено шлифование некоторых хрупких кристаллических материалов в режиме пластичности. Последующее повышение точности данной установки позволило улучшить чистоту обработки заготовок из хрупкого материала. На основании исследований было установлено, что существует интервал врезных подач, которые традиционно не используются ни при шлифовании, ни при полировании.

Эта область врезных подач на оборот шлифовального круга получила название «микрошлифовальный пробел». В него входят врезные подачи на оборот шлифовального круга в пределах 5...7 нм. При шлифовании практически всех хрупких материалов его удаление протекает путем локализованного разрушения. С другой стороны, полирование обеспечивает удаление материала без хрупкого разрушения. Поэтому существует интервал скоростей, соответствующих переходу от абразивной обработки в режиме хрупкости к обработке в режиме пластичности, для различных видов стекол, керамики и полупроводников.

Сформулированная нами гипотеза шлифования в режиме пластичности гласит: «Все материалы независимо от их твердости и хрупкости в процессе механической обработки претерпевают переход от хрупкого режима удаления материала к пластическому, если подача достаточно мала».

Переход от хрупкого удаления материала к пластическому при малых глубинах резания обоснован с использованием чисто энергетического подхода к удалению материала. Для малых глубин резания пластическое течение - энергетически более выгодный механизм удаления материала, чем разрушение. Сопротивление материала пластическому течению характеризуется его пределом текучести. Конкретная глубина резания, при которой происходит хрупко-пластический переход, зависит от свойств материала, ответственных за характер его пластической деформации и разрушения.

На основании сопоставления параметров перехода к режиму пластичности и свойств соответствующих материалов предложена модель расчета критической глубины резания при микрошлифовании. Модель связывает измеренную критическую поперечную подачу, когда доля поверхности, подвергшейся разрушению, равна 10 %, с критической глубиной резания, рассчитанной по свойствам материала (10 %-я доля поверхности, подвергшейся разрушению, выбрана произвольно и является показателем хрупко-пластического

перехода).

Предложенная модель базируется на формуле для критической глубины разрушения при вдавливании твердого материала с использованием критерия Гриффита для распространения трещины. Для материалов, характеризуемых наличием пластической зоны у вершины трещины, ее величину можно определить по классической теории Гриффита распространения трещины.

Сравнение экспериментальных данных, полученных при испытаниях на вдавливание, с расчетами показало хорошее их соответствие, даже если используются данные о свойствах больших объемов материала. Если таким методом рассчитать процесс шлифования, то можно найти критическую скорость поперечной подачи при шлифовании, при которой должен произойти переход от хрупкого режима удаления материала к пластическому.

Таким образом, можно построить последовательность хрупких материалов в соответствии с определяемой их свойствами поперечной подачей, ниже которой хрупкое разрушение при шлифовании происходит не будет.

Наличие плоскостей кристаллизации в анизотропных веществах значительно затрудняет пластическое резание в «твердом» направлении.

Установленная корреляционная зависимость между критической глубиной вдавливания, модулем упругости, энергией разрушения материала и величиной его твердости требует накопления банка данных на основе проведения предварительных экспериментальных исследований. Так как в реальном процессе резания будет иметь место существенное изменение радиуса кривизны режущих зерен шлифовального круга в связи с их истиранием и размерным износом, то, следовательно, фактическая величина критической глубины вдавливания будет значительно отличаться (в сторону снижения) от предварительно полученных значений. Это обстоятельство показывает ограниченность применения данной модели для управления размерной настройкой упругой технологической системы станка в области пластич-

ного микрошлифования.

Процесс шлифования представляет собой процесс высокоскоростного микрорезания мельчайшими режущими кромками абразивных зерен, закрепленных на рабочей поверхности круга. Абразивные зерна, участвующие в работе, испытывают периодическое силовое, тепловое и химическое воздействие в момент контакта с обрабатываемой деталью.

Полное математическое описание процесса шлифования с учетом всех действующих факторов в настоящее время невозможно осуществить из-за сложности процесса. Зерна шлифовального круга имеют разную высоту, поэтому при врезании в заготовку съем основного припуска начинается не сразу. Каждое зерно оставляет на поверхности царапину. Ширина каждой царапины по мере роста глубины врезания увеличивается, и на некоторой глубине царапины сливаются в результате взаимного перекрытия. Этот процесс называется процессом врезания в заготовку.

Процесс шлифования является процессом резания по следу. В.А. Кудинов [2] описывает процесс шлифования как микрорезание по следу и представляет его как процесс в замкнутой динамической системе, в которой наличие следа создает обратную связь с запаздыванием, равным времени одного прохода. Для шлифования существенное значение имеет также обратная связь с запаздыванием через износ и затупление круга. Ее влияние выражается в появлении характерного неравномерного износа круга. Эта обратная связь обычно не учитывается.

Шлифование, как процесс пластического деформирования и разрушения материалов изделия и шлифовального круга, занимает промежуточное положение между резанием резцом и сухим трением.

Изменение условий обработки (подачи, зернистости и т.п.) влияет на силы резания через изменение фактического, а не номинального сечения срезаемого слоя.

Связь эквивалентной упругой системы (ЭУС) и резания выражается смещением в направлении изменения толщины срезаемого слоя (внедрение зерна в шлифуе-

мую поверхность). Из-за деформирования ЭУС шлифовального станка образуется погрешность обработки, определяемая разностью отжимов при нулевой и полной номинальной толщине срезаемого слоя. Одновременно происходит переход от одного установившегося состояния к другому установившемуся состоянию.

Продолжительность этого переходного процесса превышает время между проходами. Изменение силы резания в переходном процессе описывается экспонентой. Действительная толщина срезаемого слоя изменяется по этому же закону.

Для автоматизации процесса шлифования необходимо непрерывно контролировать толщину срезаемого слоя и тем самым проводить оценку размера изделия.

В работах [3; 4] описаны методы автоматизации шлифования, в основе которых лежит контроль за постоянной времени переходных процессов. Получение заданного размера осуществляется на этапе выхаживания. Процесс выхаживания осуществляется при выключенной подаче. За время переходного процесса ликвидируется накопленная погрешность размера из-за деформации и тем самым обеспечивается геометрическая точность изделия.

Эти способы автоматизации неприемлемы для обработки хрупких изделий, так как процесс выхаживания длителен. Поэтому автоматизацию процесса обработки кристаллов целесообразно осуществлять при врезании.

По проведенному анализу литературных данных можно сделать следующие

выводы:

1. Шлифование в режиме пластичности - недавно разработанный способ механической обработки. Обладающая достаточной жесткостью и высокой точностью шлифовальная установка, обеспечивающая исключительно малый съем материала, позволяет создать условия шлифования хрупких материалов в режиме пластичности. В результате заготовки из хрупких материалов можно механически обрабатывать в регулируемом режиме; при этом обеспечивается чистота обработки поверхности, ранее достижимая только в нерегулируемых процессах, осуществляемых в режиме пластичности, таких как полирование и притирка.

2. Шлифование в режиме пластичности можно достичь, если обеспечить жесткость конструкции шлифовальной установки, регулирование поперечной подачи в режиме реального времени, относительную изоляцию от внешних возмущений и современную технологию правки шлифовального круга.

3. Если глубина резания достаточно мала, все хрупкие материалы могут обрабатываться в режиме пластического течения, а не хрупкого разрушения.

4. Существует корреляция между поперечной подачей, соответствующей хрупко-пластическому переходу для данного материала, и его свойствами. Эта корреляция хорошо описывается простым степенным законом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Toh, S.B. Fine Scale Abrasive Wear of Ceramic by a Plastic Cutting Process, Science of Hard Materials / S.B. Toh, R. McPherson // Inst. Phys. Conf. Serf. - Adam Hilder, Ltd., Rhodes, 1986. - № 75. - Chap. 9. - P. 865-871.
2. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. - М.: Машиностроение, 1967.
3. Коншин, А.С. Управление процессом шлифования для повышения производительности и точности при одновременной многоинструментальной обработке: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Коншин. - М., 1987.
4. Михельевич, В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михельевич. - М.: Машиностроение, 1975. - 304 с.
1. Toh, S.B. Fine Scale Abrasive Wear of Ceramic by a Plastic Cutting Process, Science of Hard Materials / S.B. Toh, R. McPherson // Inst. Phys. Conf. Serf. - Adam Hilder, Ltd., Rhodes, 1986. - № 75. - Chap. 9. - P. 865-871.
2. Kudinov, V.A. *Machines Dynamics* / V.A. Kudinov. – M.: Mechanical Engineering, 1967.
3. Konshin, A.S. *Grinding Control for Productivity and Accuracy Increase at Simultaneous Multi-instrumental Machining*: thesis self-abstract for

Can. Eng. degree competition / A.S. Konshin. –  
M.: 1987.  
4. Mikhelkevich, V.N. *Automatic Control of Grinding*

/ V.N. Mikhelkevich. – M.: mechanical Engineering, 1975. – pp. 304.

*Статья поступила в редакцию 5.01.18.*

*Рецензент: д.т.н., профессор*

*Дмитрак Ю.В.*

**Сведения об авторах:**

**Сильченко Ольга Борисовна**, д.т.н., профессор  
Московского авиационного института, e-mail:  
[silyaolya@yandex.ru](mailto:silyaolya@yandex.ru).

**Silchenko Olga Borisovna**, D. Eng., Prof. of Moscow  
Aircraft, e-mail: [silyaolya@yandex.ru](mailto:silyaolya@yandex.ru).

УДК 65.011.56

DOI: 10.12737/article\_5a795ff9cdcd84.67429059

## Информатика, вычислительная техника и управление

Ю.А. Кропотов, Н.Е. Холкина

### ФУНКЦИИ РЕГРЕССИИ И МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ В ЗАДАЧАХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ АКУСТИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ

Исследуются решения задачи восстановления зависимостей методом построения функции регрессии, методом наименьших квадратов. Рассматривается оценивание параметров акустических сигналов методами параметрической оптимизации. Рассматриваются методы регуляризации при решении некорректных задач восстановления зависимо-

стей линейной регрессии. Исследуются вопросы идентификации процессов и аппроксимации.

**Ключевые слова:** акустические сигналы, линейная регрессия, нелинейная регрессия, метод наименьших квадратов, параметрическое моделирование, квадратичная функция потерь.

Yu.A. Kropotov, N.E. Kholkina

### REGRESSION FUNCTIONS AND LEAST-SQUARES METHOD IN PROBLEMS OF PARAMETRIC MODELING IN INFORMATION EXCHANGE SYSTEMS BY ACOUSTIC SIGNALS

This paper reports the solution investigations of dependencies recovery problems through the method of regression function formations with the least-squares method. The assessment of acoustic signal parameters by methods of parametric optimization is considered. Regulation methods at the solution of ill-conditioned problems of linear regression dependences recovery are under consideration. The identification problems of processes and approximation are under investigation. The investigation object is acoustic signals. The purpose of the work consists in the development of a signal parametric model and also in that of algorithms for the identification and assessment of processes against a background of interference.

Dependences recovery by methods of a linear regression and also belongs to the class of ill-conditioned problems. The incorrectness of a linear regression is explained by a possible growth of an error

in continuous metrics, despite the fact that in a discrete metrics an error tends to zero.

A peculiarity of the generalization, based on the method of regression and least squares, consists in the realization of operators manifesting discrete data in the space of continuous or piecewise-continuous functions.

The obtained results on the development of methods and algorithms, directed on the recovery of smooth functions according to discrete data, open potentialities for the solution of problems of local processing and smoothing both stationary signals and non-stationary ones, the problems of the analysis of acoustic signals and speech dynamics, problems of the analysis of multi-extreme dependences.

**Key words:** acoustic signals, linear regression, non-linear regression, least-squares method, parametric modeling, loss quadratic function.

#### Введение

Оценка параметров акустических сигналов и помех основывается на эмпирических результатах измерений, полученных из эксперимента [1]. Известен ряд

методов получения таких оценок. К ним относятся параметрические и непараметрические, прямые и косвенные методы.

#### Алгоритмы идентификации в исследованиях временных рядов и в оценивании процессов на фоне почти произвольных помех

Как известно, функция регрессии, которая зависит от некоторого числа параметров, может рассматриваться как отоб-

ражение одного пространства переменных в другое [2 - 4]. При этом задача построения функции регрессии заключается в

нахождении ее неизвестных параметров. Без ограничения общности эта функция может быть записана в виде

$$y(x) = \phi(x, \theta), \quad x \in R^n, \quad \theta \in R^m, \quad y \in R.$$

Обобщение задачи на случай, когда пространство зависимых переменных является многомерным, то есть  $y \in R^q$ , особых затруднений не вызывает.

На практике чаще всего используется линейная регрессия с функцией

$$y(x) = \langle \phi(x), \theta \rangle = \sum_{k=1}^m \theta_k \phi_k(x) = \phi^T(x) \theta.$$

Здесь  $\phi_k(x)$ ,  $k = 1, \dots, m$ , образуют систему линейно независимых функций. Вектор  $\phi(x) = (\phi_1(x), \dots, \phi_m(x))^T$ ,  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_m)^T$ . Известна также и квазилинейная регрессия [5], описываемая функцией

$$y(x) = g(\langle \phi(x), \theta \rangle),$$

Минимизация подобных функций составляет содержание метода наименьших квадратов.

Метод наименьших квадратов и линейная регрессия применяются в адаптивных и обучающихся системах, алгоритмах идентификации, при анализе временных рядов и оценивании процессов на фоне почти произвольных помех [5; 6]. Во всех указанных областях наблюдаемый сигнал  $y(t)$  рассматривается, как правило, в виде аддитивной смеси оцениваемого сигнала  $x(t)$  и случайной помехи или шума  $n(t)$ :  $y(t) = x(t) + n(t)$ .

Оценка сигнала при этом представляется многочленом (1) по системе линейно независимых базисных функций  $\{\phi_k(t)\}_1^m$ :

$$\hat{x}(t) = \sum_{k=1}^m \theta_k \phi_k(t) = \theta^T \phi(t).$$

Если оценке подлежит векторный сигнал размерности  $p$ , то есть вектор  $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_p(t))^T$ , то его оценку мож-

где функция  $g(y)$  удовлетворяет необходимым условиям дифференцируемости.

Параметры  $\theta_1, \dots, \theta_m$  находятся в результате минимизации некоторой функции, заданной на дискретном множестве наблюдений. Эту задачу можно записать в виде

$$Q(y_k, \phi(x_k, \theta), k = 1, \dots, m) \rightarrow \min.$$

Обычно эта задача дополняется рядом ограничений, вытекающих из условий задачи или обеспечивающих ее корректное и робастное решение. При этом приходится иметь дело с задачей условной минимизации.

В дальнейшем в качестве независимой переменной будет, как правило, выступать одномерная переменная – время. Соответственно и базисные функции  $\phi_k(x)$  будут зависеть от одной переменной.

В задачах линейной и квазилинейной регрессии часто используется квадратичная функция потерь

$$Q(\theta) = \sum_{j=1}^N (y_j - \langle \phi(x_j), \theta \rangle)^2 \text{ или } Q(\theta) = \sum_{j=1}^N (y_j - g(\langle \phi(x_j), \theta \rangle))^2.$$

но записать в виде

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \Theta^T \phi(t).$$

Вектор наблюдаемых данных при этом можно аппроксимировать выражением

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \Theta^T \phi(t) + \mathbf{n}(t),$$

где  $\mathbf{n}(t)$  – вектор помехи, а  $\Theta$  – матрица коэффициентов многочленов:

$$\Theta = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \dots & \theta_{1p} \\ \theta_{21} & \dots & \theta_{2p} \\ \dots & \dots & \dots \\ \theta_{m1} & \dots & \theta_{mp} \end{pmatrix}.$$

Вектор ошибки аппроксимации можно записать в виде

$$\mathbf{d}(t) = \hat{\mathbf{y}}(t) - \mathbf{y}(t) = \Theta^T \phi(t) - \mathbf{y}(t).$$

Его норма определяется выражением

$$\|\mathbf{d}(t)\| = \left\langle \Theta^T \phi(t) - \mathbf{y}(t), \Theta^T \phi(t) - \mathbf{y}(t) \right\rangle^{1/2}.$$

Отсюда следует, что задача аппроксимации заключается в нахождении мат-

рицы  $\hat{\Theta}$  коэффициентов, обеспечивающей минимальное значение нормы ошибки на интервале  $T$ . Используя интеграл Стильсса, усредненное на указанном интервале

$$g_T(\Theta) = \int_T \langle \Theta^T \varphi(t) - \mathbf{y}(t), \Theta^T \varphi(t) - \mathbf{y}(t) \rangle \mu(dt).$$

Для дискретного сигнала это выражение принимает вид

$$g_T(\Theta) = \sum_{t_k \in T} \langle \Theta^T \varphi(t_k) - \mathbf{y}(t_k), \Theta^T \varphi(t_k) - \mathbf{y}(t_k) \rangle. \quad (2)$$

Тогда оценку матрицы параметров можно получить в результате минимизации функции (2):

$$\hat{\Theta} = \arg \min_{\Theta} g_T(\Theta).$$

Следует отметить, что в принципе возможна и минимаксная оценка параметров:

$$g_\psi(\hat{x}(t)) = \sum_{j=0}^r \sum_{k=0}^p \psi_j \left( \Theta^T \varphi^{(j)}(t_k) - y^{(j)}(t_k) \right),$$

где в качестве функций  $\psi_j(x)$  могут выступать функции Хьюбера, Мешалкина и Демиденко [7], определяемые соответственно как

$$\begin{aligned} \psi_H(x) &= \begin{cases} x^2, & |x| \leq c \\ 2c|x| - c^2, & |x| > c \end{cases}, \\ \psi_M(x) &= \frac{1}{\lambda} \left( 1 - e^{-\lambda x^2/2} \right), \lambda > 0, \\ \psi_D(x) &= \frac{x^2}{x^2 + c}, c > 0. \end{aligned}$$

Оценивание параметров функций регрессии осуществляется фактически методами параметрической оптимизации [7; 8].

значение ошибки можно записать в виде выражения, справедливого как для непрерывного, так и для дискретного сигнала:

$$\hat{\Theta} = \min_{\Theta} \min_{t \in T} \| \mathbf{d}(t) \|.$$

В целях обеспечения робастности задачи минимизации, то есть для снижения чувствительности решений к большим ошибкам измерения, рекомендуется применение квазилинейной регрессии

Похожим способом в ряде случаев можно решить и задачу идентификации оператора  $A(\Theta)$  системы. Пусть, например, наблюдаемые данные  $y(t)$  описываются выражением

$$y(t) = A(\Theta)x(t) + n(t).$$

Здесь, как и выше, шумы измерения обозначены как  $n(t)$ , а  $\Theta$  – вектор оцениваемых параметров.

Критерий качества можно задать выражением

$$g_T(\Theta) = \int_T \langle A(\Theta)x(t) - y(t), A(\Theta)x(t) - y(t) \rangle \mu(dt).$$

При этом параметры находятся в результате его минимизации. В случае систем с переменными параметрами оператор  $A(\Theta)$  может зависеть от ряда функций

$\Theta_k^T \varphi(t)$ , то есть иметь вид

$$A(\Theta) = A(\Theta_k^T \varphi(t), k = 1, \dots, q).$$

### Методы регуляризации при решении некорректных задач восстановления зависимостей линейной регрессии

По своему определению функции регрессии – это функции непрерывного времени, независимо от характера наблюдаемых данных. Если последние имеют дискретный характер, то на интервалах между

выборками поведение функции регрессии может оказаться неконтролируемым. Решение этой проблемы достигается применением соответствующего регуляризирующего функционала, определенного на

всей временной оси. Регуляризирующими свойствами обладают, например, частотные и интегральные характеристики функций на соответствующих конечных интервалах. Так, регуляризацию можно обеспечить ограничениями на энергетический спектр восстановленного сигнала в области высоких частот и форму сигнала в целом.

Если преобразование Фурье взвешенной функции  $x(t)$  с весом

$$w(t) = \begin{cases} \alpha_1, & t \in [T_1, T_2] \\ \alpha_2, & t \notin [T_1, T_2] \end{cases}$$

где  $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq 1$ , обозначить как

$$\tilde{x}_w(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t)x(t)e^{-j\omega t} dt,$$

то соответствующий функционал в частотной области можно записать в виде

$$G_W(\tilde{x}_w(\omega)) = \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega)|\tilde{x}_w(\omega)|^2 d\omega,$$

где весовая функция в частотной области удовлетворяет условию

$$G_W(\tilde{x}_w(\omega)) = \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega)|\tilde{x}_w(\omega)|^2 d\omega.$$

При аппроксимации с помощью всплесков в качестве ограничивающей функции можно воспользоваться высокочастотной частью разложения

$$\sum_{n=j}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x, \psi_{nk} \rangle \psi_{nk}(t),$$

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{D} \left( x(a)e^{d_0 b} - x(b)e^{d_0 a} \right) e^{-d_0 t} + \frac{1}{D} \left( -x(a)e^{-d_0 b} + x(b)e^{-d_0 a} \right) e^{d_0 t},$$

где  $D = e^{d_0(b-a)} - e^{-d_0(b-a)}$ .

Принимая на этой функции минимальное значение, рассматриваемый функционал является характеристикой, отражающей близость функций к кривой экспоненциального типа, проходящей через заданные граничные точки. При стремлении коэффициента  $d_0$  к нулю эта кривая превращается в прямую линию, проходящую через точки  $x(a)$  и  $x(b)$ ,

$$\hat{x}(t) = x(a) \frac{b-t}{b-a} + x(b) \frac{t-a}{b-a},$$

записав эту функцию в виде

$$g_w = \int_{-\infty}^{\infty} w(t) \left| \sum_{n=j}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x, \psi_{nk} \rangle \psi_{nk}(t) \right|^2 dt.$$

Регуляризацию можно обеспечить и с помощью ограничений, налагаемых на интегро-дифференциальные характеристики функций регрессии в пределах соответствующих интервалов:

$$H(x(t)) = \int_a^b \left( |d_0 x(t)|^2 + \sum_{j=1}^r |d_j x^{(j)}(t)|^2 \right) dt,$$

где  $d_j$  – некоторые коэффициенты. Подобное выражение используется, например, при оценке качества систем автоматического регулирования.

Смысл этого ограничения можно рассмотреть на примере функционала

$$H(x(t)) = \int_a^b (|d_0 x(t)|^2 + x(t))^2 dt.$$

Функция  $x(t)$ , обеспечивающая экстремальное значение функционала (3), является решением дифференциального уравнения  $\ddot{x}(t) = d_0^2 x(t)$ , то есть решением уравнения Эйлера экстремальной задачи. Его общее решение имеет вид  $x(t) = c_1 e^{-d_0 t} + c_2 e^{d_0 t}$ . Если потребовать, чтобы оно в точках  $a$  и  $b$  удовлетворяло заданным граничным условиям, то искомое частное решение

а функционал, определенный на произвольной функции  $x(t)$ , является мерой ее отклонения от этой линии. Аналогично функционалам общего вида соответствуют дифференциальные уравнения более высокого порядка, решения которых можно считать эталонами. Все это обуславливает возможность использования подобных функционалов при аппроксимации в целях придания результирующим функциям более регулярной формы.

Таким образом, существует множество различных способов регуляризации,

приводящих к минимизации функционала вида

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} (Q(\theta) + \varepsilon \Omega(x(t), \theta)),$$

что требует, как правило, применения численных методов оптимизации [9].

Техника регуляризации широко используется при решении и других некорректных задач, например задач восстановления сигналов [9; 10], связанных с решением интегральных уравнений

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau)x(\tau)d\tau + n(t) = y(t),$$

где  $y(t)$  и  $n(t)$  – наблюдаемый процесс и шум измерения соответственно;  $x(t)$  – исходный процесс;  $h(t)$  – импульсная функция (ядро уравнения). Задача в этом случае сводится к минимизации функционала

### Заключение

Особенность обобщения, основанного на методе регрессии и наименьших квадратов, заключается в реализации операторов, отображающих дискретные данные в пространстве непрерывных или кусочно-непрерывных функций.

Полученные результаты по разработке методов и алгоритмов, ориентирован-

$$\|A \cdot x - y\|^2, \quad (4)$$

где  $A \cdot x \equiv \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau)x(\tau)d\tau$ .

При дополнении функционала (4) регуляризующим функционалом  $\Omega(x)$  решение задачи сводится к минимизации функционала следующего вида:

$$\hat{x}(t) = \arg \min_x (\|A \cdot x - y\|^2 + \alpha \Omega(x)).$$

Восстановление зависимостей методами линейной регрессии также относится к классу некорректных задач [10]. Некорректность линейной регрессии объясняется возможным ростом ошибки в непрерывной метрике [3], при том что в дискретной метрике ошибка стремится к нулю.

ных на восстановление по дискретным данным в целом гладких функций, открывают возможности по решению задач локальной обработки и сглаживания как стационарных, так и нестационарных сигналов, задач анализа акустических сигналов и динамики речи, задач анализа многоэкстремальных зависимостей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вапник, В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным / В.Н. Вапник. - М.: Наука, 1979. - 448 с.
2. Гроп, Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп. - М.: Мир, 1979. - 304 с.
3. Демиденко, Е.З. Оптимизация и регрессия / Е.З. Демиденко. - М.: Наука, 1989. - 296 с.
4. Быков, А.А. Модель закона распределения вероятности амплитуд сигналов в базисе экспоненциальных функций системы / А.А. Быков, Ю.А. Кропотов // Проектирование и технология электронных средств. - 2007. - № 2. - С. 30-34.
5. Кропотов, Ю.А. Моделирование и методы исследований акустических сигналов, шумов и помех в системах телекоммуникаций: монография / Ю.А. Кропотов, В.А. Ермолаев. - М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. - 251 с.
6. Границин, О.Н. Оценивание параметров линейной регрессии при произвольных помехах / О.Н. Границин // Автоматика и телемеханика. - 2002. - № 1. - С. 30-41.
7. Кропотов, Ю.А. Алгоритм определения параметров экспоненциальной аппроксимации закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала / Ю.А. Кропотов // Радиотехника. - 2007. - № 6. - С. 44-47.
8. Кропотов, Ю.А. Методы оптимизации в задачах локальной аппроксимации сигналов / Ю.А. Кропотов, В.А. Ермолаев // В мире научных открытий. - 2010. - № 6.1. - С. 44-47.
9. Кропотов, Ю.А. Вопросы параметрического представления нестационарных сигналов / Ю.А. Кропотов, В.А. Ермолаев // Проектирование и технология электронных средств. - 2010. - № 1. - С. 31-35.
10. Морозов, В.А. Регулярные методы решения некорректно поставленных задач / В.А. Морозов. - М.: Наука, 1987. - 240 с.

1. Vapnik, V.N. Вапник, В.Н. *Dependences Recovery on Empirical Data* / V.N. Vapnik. – М.: Science, 1979. – pp. 448.
2. Grop, D. *Methods for Systems Identification* / D. Grop. – М.: World, 1979. – pp. 304.
3. Demidenko, E.Z. *Optimization and Regression* / E.Z. Demidenko. – М.: Science, 1989. – pp. 296.
4. Bykov, A.A. Model of signal amplitude probability distribution law in basis of system exponentials / A.A. Bykov, Yu.A. Kropotov // *Design and Techniques of Electronic Means*. – 2007. – No.2 – pp. 30-34.
5. Kropotov, Yu.A. *Modeling and Methods of Investigations of Acoustic Signals, Noises and Interference in TV Communication Systems*: monograph / Yu.A. Kropotov, V.A. Yerolayev. – М.: Berlin: Direct-Media, 2016. – pp. 251.
6. Granichin, O.N. Assessment of linear regression parameters at arbitrary interference / O.N. Granichin // *Automation and Telemechanics*. – 2002. – No.1. – pp. 30-41.
7. Kropotov, Yu.A. Algorithm for exponential approximation parameters definition of speech signal amplitude probability distribution law / Yu.A. Kropotov // *Radio Engineering*. – 2007. – No.6. – pp. 44-47.
8. Kropotov, Yu.A. Methods for optimization in problems of local signal approximation / Yu.A. Kropotov, V.A. Yerolayev // *In the World of Scientific Discoveries*. – 2010. – No.6.1. – pp. 44-47.
9. Kropotov, Yu.A. Problems in parametric presentation of non-stationary signal / Yu.A. Kropotov, V.A. Yermolayev // *Design and Techniques of Electronic Means*. – 2010. – No.1. – pp. 31-35.
10. Morozov, V.A. *Regular Methods for Solution of Ill-posed Problems* / V.A. Morozov. – М.: Science, 1987. – pp. 240.

*Статья поступила в редакцию 11.12.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор  
Орлов А.А.*

#### Сведения об авторах:

**Кропотов Юрий Анатольевич**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой ЭиВТ Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, тел. (49234) 77-2-72, e-mail: [kaf-eivt@yandex.ru](mailto:kaf-eivt@yandex.ru).

**Kropotov Yury Anatolievich**, D. Eng., Prof., Head of the Dep. of E&CT, Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: [kaf-eivt@yandex.ru](mailto:kaf-eivt@yandex.ru).

**Холкина Наталья Евгеньевна**, доцент кафедры ЭиВТ Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, тел. (49234) 77-2-72 , e-mail: [kaf-eivt@yandex.ru](mailto:kaf-eivt@yandex.ru).

**Kholkina Natalia Yevgenievna**, Assistant Prof. of the Dep. of E&CT, Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: [kaf-eivt@yandex.ru](mailto:kaf-eivt@yandex.ru).

УДК 37.378

DOI: 10.12737/article\_5a795ffa8d8509.47408301

Р.Р. Анамова, С.А. Леонова, Г.К. Хотина

## КОНСТРУИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В СРЕДЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SOLIDWORKS

Обоснована необходимость обучения навыкам конструирования уже на начальной стадии преподавания общетехнической дисциплины «Инженерная графика» с применением компьютерной графики. Описан алгоритм твердотельного модели-

рования отдельных элементов деталей летательных аппаратов (ЛА) сложной формы.

**Ключевые слова:** конструирование, качалки, кронштейны, эскизы заготовок, твердотельное моделирование, SolidWorks.

R.R. Anamova, S.A. Leonova, G.K. Khotina

## DESIGN OF AIRCRAFT PRODUCT IN ENVIRONMENT OF SOLIDWORKS GEOMETRICAL SOLID STATE MODELING

The paper is dedicated to the scientific-methodical aspect of material presentation for carrying out a graphic work of “Development of assembly unit design documentation for aircraft products”. By the specific example there is considered a procedure for training to develop drawings on the basis of 3-D model offered in connection with the necessity of skills acquisition of designing already at the initial stage of teaching a general engineering subject - “Engineering Graphics”.

The purpose of this work consists in the teaching process approach to an engineer’s actual activity. As a method of training there is chosen a circuit: sketch development of a flat contour of “Bell Crank (Supporting Level)”; 3D model creation; drawing development. The work is carried out on the basis of an actual product from the task package for the development of design documentation for aircraft assembly units. The stages of the 3D model development of “Bell Crank” (Supporting Level) product in the environment of SolidWorks software product with design documenta-

tion fulfillment in 3D Compass environment are described.

Basic results in future experts’ training with the use of this form of training are reduced to the following: a field of training at the expense of the introduction of new skills of work with software products is expanded; a basis for the development of electronic design documentation in any software product at the expense of SolidWorks system compatibility with other graphic products is prepared. The method developed is tested during the work with students of “Aircraft and Helicopter Engineering” and “Missile Complexes and Cosmonautics” specialties.

The application of the offered teaching procedure contributes to the quality increase in training future experts in design specialties. The skills obtained at this stage of training may be successfully used at the level of training-research works of senior students.

**Key words:** designing, bell cranks, brackets, drafts of blanks, solid state modeling, SolidWorks.

### Введение

Одним из наиболее важных этапов разработки изделий (моделей, деталей, узлов агрегатов и т. д.) является этап конструирования. В его основе лежит весь опыт разработки изделий, воплощенный в эскизах, чертежах, реально выполненных образцах изделий, а также в электронных геометрических моделях, в частности трехмерных твердотельных моделях. Модифицируя исходную модель,

разработчик достигает желаемых результатов. В общем виде этапы 3D-моделирования изображены на рис. 1.

Для конструкторских специальностей технических вузов является важным приобретение студентами навыков конструирования и проектирования уже на начальной стадии обучения. На кафедре «Инженерная графика» Московского авиационного института данная проработ-

ка выполняется уже на первой графической работе - «Построение плоского контура» [1]. Плавные обводы и сопряжения типовых элементов - прямых, дуг, окружностей - встречаются повсеместно в изделиях авиационной техники. Указанные навыки необходимо применить на этапе выполнения и оформления конструкторор-

ских документов летательных аппаратов по готовым изделиям, разработав твердотельные модели сборочной единицы и ее составляющих частей средствами компьютерной графики с применением пакетов твердотельного моделирования SolidWorks, КОМПАС или иных доступных для разработчика программ.

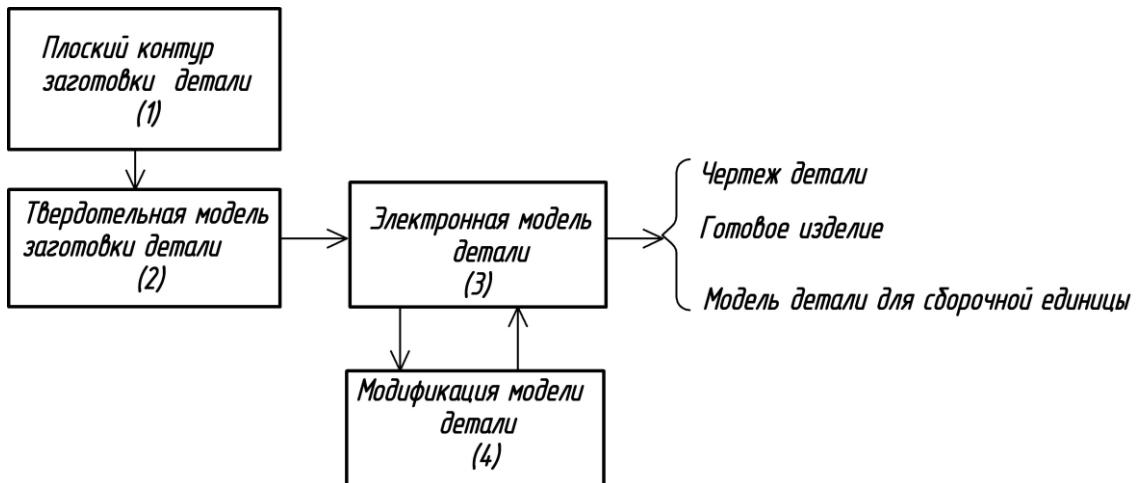


Рис. 1. Этапы 3D-моделирования

Механическая проводка управления современных ЛА насыщена различного рода деталями и механизмами сложных форм. В частности, это разнообразные варианты сочетания рычагов, тяг с наконечниками, кронштейнов с качалками. Исходным материалом для выполнения задания являются специализированные изделия - составные части агрегата ЛА. В процессе работы необходимо: разработать схему деления изделия на составные части, спецификации изделий, твердотельные модели изделий, входящих в сборочную единицу, твердотельную модель сборочной единицы; используя трехмерные модели, выпустить чертежи на сборочную единицу и все составные части изделия.

В качестве примера рассмотрим один из элементов системы управления - кронштейн с качалкой (рис. 2), состоящий из двух сборочных единиц: кронштейна (рис. 3) и качалки (рис. 4), соединенных крепежным комплектом (болт, гайка, шайба, шплинт).

На этапе изучения основных правил построения, выполнения и оформления конструкторских документов изделий авиационной техники студент должен иметь представление о назначении изделия и технологии изготовления сложных деталей летательных аппаратов. Эти знания в дальнейшем необходимо применить при выполнении чертежей или эскизов в соответствии с государственными и отраслевыми стандартами.

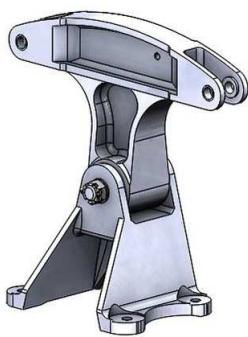


Рис. 2. Кронштейн с качалкой



Рис. 3. Кронштейн в сборе

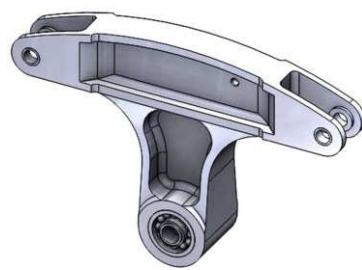


Рис. 4. Качалка в сборе

### Разработка схемы деления и спецификаций на сборочную единицу «Кронштейн с качалкой»

Для наилучшего понимания изделия и установления взаимосвязи составляющих элементов разработка конструкторской документации начинается с проработки схемы деления изделия на составные части (рис. 5). В состав изделия «Кронштейн с качалкой» входят две сборочные едини-

цы - качалка и кронштейн, а также комплект крепежных изделий, необходимый для их соединения: болт, гайка, шайба, шплинт. При разработке сборочной единицы «Качалка» учитывается установка подшипников в ступице (рис. 6).

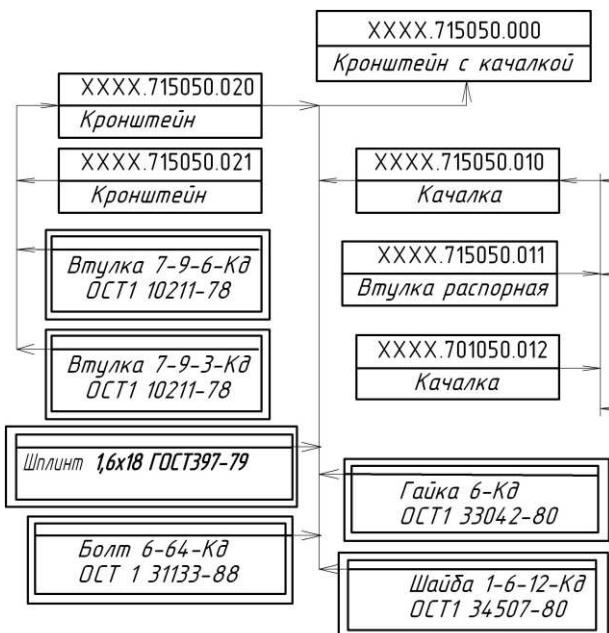


Рис. 5. Фрагмент схемы деления изделия на составные части

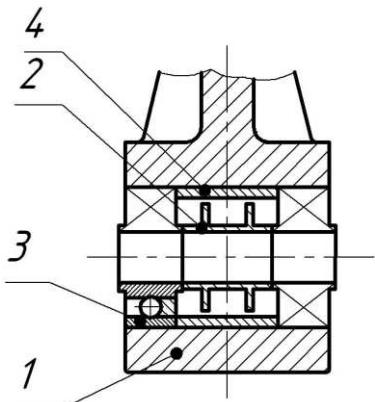


Рис. 6. Ступица качалки: 1 – ступица качалки; 2 - распорная втулка (внутренняя); 3 - подшипник; 4 - распорная втулка (внешняя) по ОСТ 1 11112-73 или ОСТ 1 11113-73

		XXXX.701050.010СБ	Сборочный чертёж	
		Детали		
4	1	XXXX.701050.011	Втулка распорная	1
54	2	XXXX.701050.012	Качалка	
			АКб Т1 гр.контр.3	
			ОСТ 1 900073-2	1

Рис. 7. Фрагмент спецификации на сборочную единицу «Качалка»

A2		XXXX.701050.020СБ	<i>Сборочный чертеж</i>	
			<i>Детали</i>	
B4	1	XXXX.701050.021	<i>Кронштейн</i>	
			<i>А/19-1-Т5 гр.контр.2</i>	
			<i>ОСТ1 90021-79</i>	1

Рис. 8. Фрагмент спецификации на сборочную единицу «Кронштейн»

Необходимо отметить, что спецификации, фрагменты которых представлены на рис. 7 и 8, выполняются для случая, когда чертеж детали совмещается со сборочным чертежом сборочной единицы. Такая деталь не имеет отдельного чертежа и называется бесчертежной деталью.

Сборочный чертеж с бесчертежной деталью должен содержать следующую информацию:

1. Данные, необходимые для сборки и контроля сборочной единицы (изображение, размеры, позиции, технические требования).
2. Данные, необходимые для изготовления и контроля БЧ детали (геометрические формы, размеры, технические

требования). Сведения о шероховатости детали указывают в технических требованиях.

3. В спецификации для сборочной единицы с БЧ деталью сначала записывают детали, изготавливаемые по отдельным чертежам, а только потом БЧ детали, для которых в графе «Формат» пишут «БЧ» (без чертежа), в графе «Обозначение» записывают обозначение детали, в графе «Наименование» - наименование детали. Марку материала записывают ниже, под наименованием изделия.

Все три документа (рис. 5,7,8) разработаны в графической системе КОМПАС-3D.

### Конструирование твердотельной модели изделия «Качалка» в среде SolidWorks

Какой бы системой геометрического моделирования ни пользовался разработчик, суть сводится к следующему: 1 - разработка эскиза модели; 2 - разработка электронной модели, на основании которой выполняется чертеж изделия.

Анализируя парк сборочных единиц и разнообразных деталей, авторы пришли к выводу, что для профессиональной работы с инструментами 3D-моделирования необходимо: приобрести навыки построения сложных эскизов, на основе которых формируется твердотельная электронная модель изделия; освоить команды рисования («Линия», «Осевая линия», «Окружность», различные способы построения дуг и т. д.), т. е. команды объекта эскиза, а также команды, объединенные в блок инструментов эскиза («Скругление», «Фаски», «Смещение объектов», «Отсечь», «Зеркальное

отображение» и т. д.); уметь пропавлять размеры; уметь работать с различного рода ограничениями, такими как взаимосвязи и привязки.

Перед началом разработки эскиза выполняется анализ исходной детали. Выявляются особенности, такие как симметричность, повторяющиеся элементы, расположение плоскости эскиза в пространстве и др. Это поможет оптимально применить команды эскиза, быстрее и качественнее сформировать электронную модель.

Алгоритм разработки моделей в среде SolidWorks заключается в выполнении следующих действий:

1. Активизация меню «Эскиз».
2. Выбор плоскости построения («Спереди», «Сверху», «Справа») в «Дереве конструирования».

3. Выполнение необходимых построений.

4. Выбор команд моделирования объема из меню «Элементы».

Конструирование изделия «Качалка» в электронном виде выполняется поэтапно в соответствии с технологическим процессом изготовления изделия.

**Этап 1.** Рисование эскиза изделия «Качалка» (рис. 8) и построение модели путем вытягивания эскиза на заданное расстояние (рис. 9). После запуска SolidWorks, создания документа («Новый»), выбора шаблона («Деталь») раскрывается пользовательский интерфейс. Активизируется меню «Эскиз». На «Дереве конструирования» выбирается плоскость рисования «Спереди». Построение эскиза, как обычно, начинается с рисования осевых линий (рис. 9). Центр интерфейса необходимо совместить с центром дуги радиусом 17 мм. С использованием команд «Окружность», «Линия», «Дуга»

по трем точкам выполняется построение эскиза, контур которого уточняется с помощью команд «Автоматическое нанесение размеров», «Добавить взаимосвязь», «Отсечение объектов». В результате строится замкнутый контур (рис. 9). Построение эскиза завершается выходом из режима рисования эскиза и сохранением файла («Файл», «Сохранить как»). Объемная модель твердого тела формируется путем активизации меню «Элементы», выбора команды «Вытянутая бобышка». В диалоговом окне команды выбирается способ построения модели: «От» (плоскость для эскиза), «Направление 1» (на заданное расстояние), «D1» (36 мм). Изображение модели заготовки изделия «Качалка» показано на рис. 10.

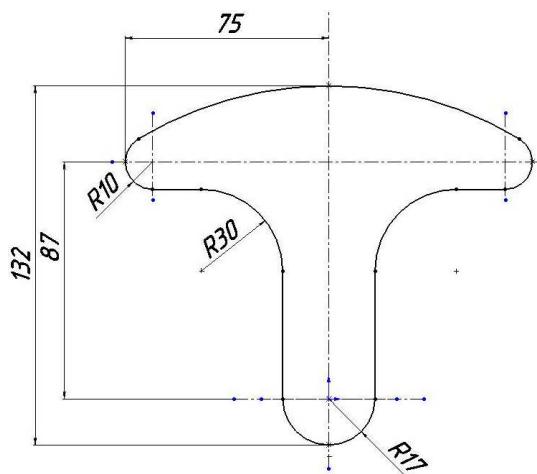


Рис. 9. Эскиз качалки

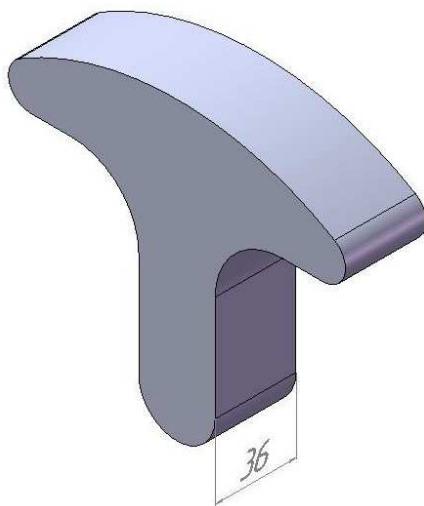


Рис. 10. Модель формы заготовки качалки

**Этап 2.** Конструирование отверстий в теле изделия «Качалка» (рис. 11, 12). Какой бы разнообразной формы ни встречались качалки, все они имеют три основных элемента: проушины, тело и ступицу. Ступица (рис. 6) в общем случае – это центральная часть детали с отверстием для посадки на вал или ось.

В заготовке модели качалки (рис. 10) выдавливаются отверстия для установки

втулок и подшипников. Согласно описанному алгоритму моделирования изделия, выполняется переход в меню «Эскиз», выбирается плоскость построения «Спереди». Восстанавливаются осевые линии. Выполняется построение окружности диаметром 24 мм с центром в нулевой точке. На одной из сторон чертится окружность диаметром 9 мм на расстоянии 66 мм от вертикальной оси. Для простановки разме-

ров активизируется команда «Автоматическое нанесение размеров». Симметричное отображение окружности диаметром 9 мм относительно вертикальной оси выполняется командой «Зеркальное отображение» (рис. 11). Для формирования объемной модели с выдавленными отверстиями активизируется команда «Вытянутый вырез» меню «Элементы». В диалоговом окне команды выбирается способ построения выреза: «От» (плоскость для эскиза),

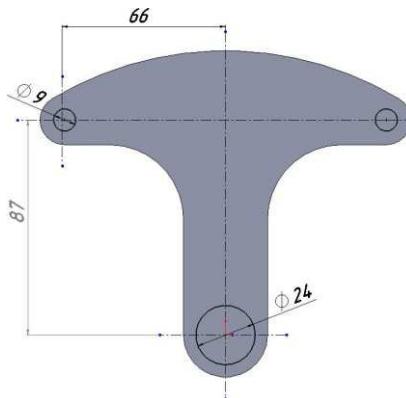


Рис. 11. Эскиз качалки с отверстиями

«Направление 1» (на заданное расстояние), «D1» (36 мм), «Направление 2» (на заданное расстояние), «D2» (36 мм) (рис. 12).

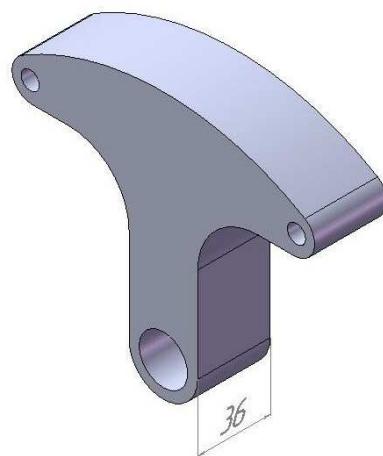


Рис. 12. Модель качалки с отверстиями

**Этап 3.** Конструирование проушин в верхней части тела изделия «Качалка» (рис. 13, 14). Для конструирования проушин на «Дереве конструирования» меню «Эскиз» выбирается плоскость построения «Спереди». На одной из сторон на плоскости эскиза чертится прямоугольник с простановкой глубины прорези (16 мм от центра окружности диаметром 9 мм). Прорисовка прямоугольника с противопо-

ложной относительно вертикальной оси стороны реализуется командой «Зеркальное отображение» (рис. 13). Активизируется команда «Вытянутый вырез» в меню «Элементы». В диалоговом окне команды выбирается способ удаления массы тела: «От» (смещение на величину, равную 24 мм), «Направление 1» (от средней поверхности), «D1» (12 мм) (рис. 14).

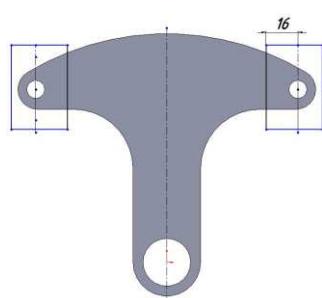


Рис. 13. Эскиз тела качалки с проушинами

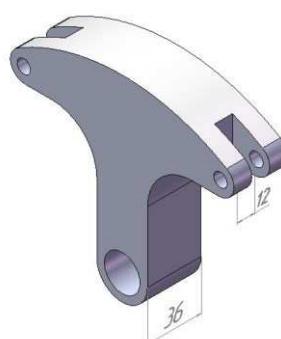


Рис. 14. Модель тела качалки с проушинами

**Этап 4.** Выдавливание массы тела в верхней и нижней частях модели изделия «Качалка» (рис. 15, 16). Тело качалки представляет собой тонкостенную конструкцию с ребрами жесткости и отверстиями облегчения. Формирование ребер жесткости путем выдавливания массы тела качалки на верхней и нижней частях модели реализуется путем прорисовки замкнутых контуров для удаления массы тела (рис. 15). При рисовании контуров в меню «Эскиз» применяются команды: «Ось линия», «Окружность», команда «Реверс», обеспечивающая смещение кромок вовнутрь на расстояние 4 мм (рис. 15а); команда «Скругление» для создания

в нижней части тела модели касательных дуг радиусом 10 и 6 мм (рис. 15б). Построение в нижней части тела качалки выполняется на одной стороне. Полный контур формируется командой «Зеркальное отображение». Линии, выходящие за основной контур, обрезаются с помощью команды «Отсечь объекты».

Для конструирования твердотельной модели на панели свойств команды «Вытянутый вырез» меню «Элементы» задается глубина 16 мм (рис. 16). С использованием любого способа зеркального отображения реализуется удаление массы тела на противоположной стороне модели.

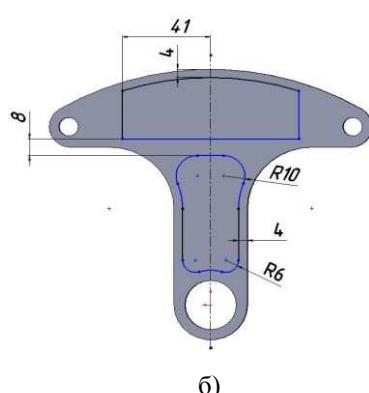
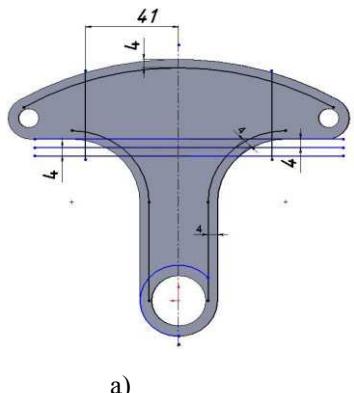


Рис. 15. Эскиз тела качалки

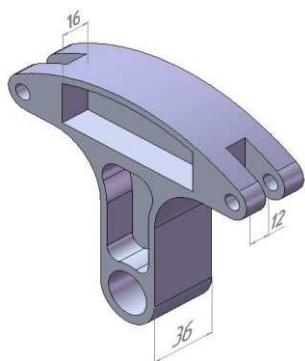


Рис. 16. Модель тела качалки

**Этап 5.** Построение профиля модели изделия «Качалка» (рис. 17, 18). Следующий этап конструирования изделия «Качалка» сводится к формированию профиля модели. На «Дереве конструирования» в меню «Эскиз» указывается плоскость «Справа». Чертится замкнутый контур, формирующий профильное изображение изделия (рис. 17). Объемная модель

строится вызовом команды «Вытянутый вырез» меню «Элементы» с указанием в меню команды следующих параметров: «От» (плоскость для эскиза), «Направление 1» (через все), «Направление 2» (через все). Завершается данная операция восстановлением внешнего контура ступицы (диаметр 34 мм) командой «Вытянутая бобышка» (рис. 18).

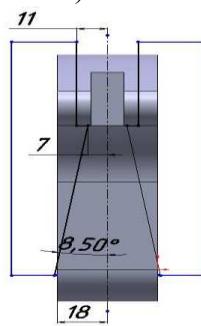


Рис. 17. Эскиз профиля тела качалки

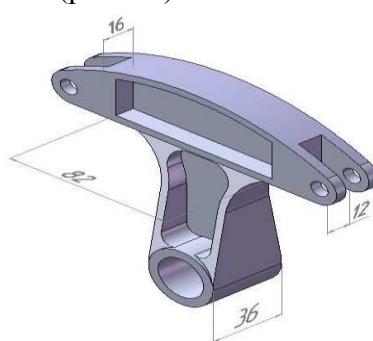


Рис. 18. Модель тела качалки

**Этап 6.** Завершение конструирования твердотельной модели изделия «Качалка» (рис. 19, 20, 21). Конструирование модели изделия «Качалка» завершается удалением слоя тела на 2 мм в верхней ее части путем прорисовки контура в меню «Эскиз», активизацией в меню «Элементы» команды «Вытянутый вырез», созданием фаски в ребрах данного контура с параметрами 45 град и 9 мм (команда «Фаска» меню «Элементы»), закруглени-

ем внутренних граней вдоль кромок в нижней части твердотельной модели радиусом 3 мм (команда «Скругление» меню «Элементы») (рис. 19), выдавливанием отверстия диаметром 3,3 мм под нарезку резьбы M4 для установки винта с тросом, снимающим статическое напряжение (рис. 20, 21).

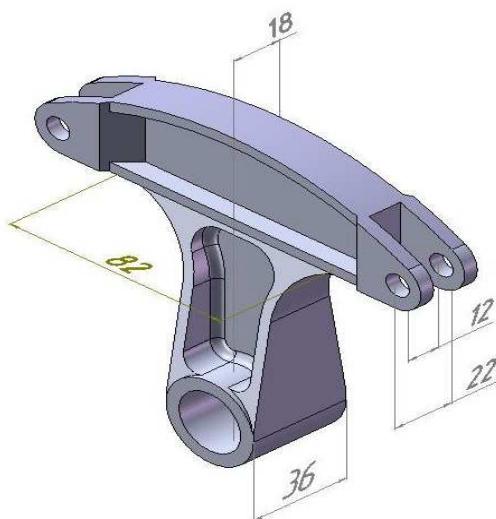


Рис. 19. Модель детали «Качалка»  
с удалением слоя тела , созданием  
фасок , закруглением кромок

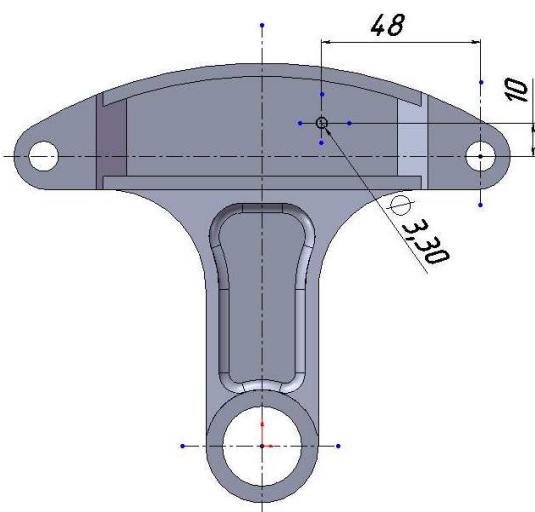


Рис. 20. Эскиз модели с отверстием под винт

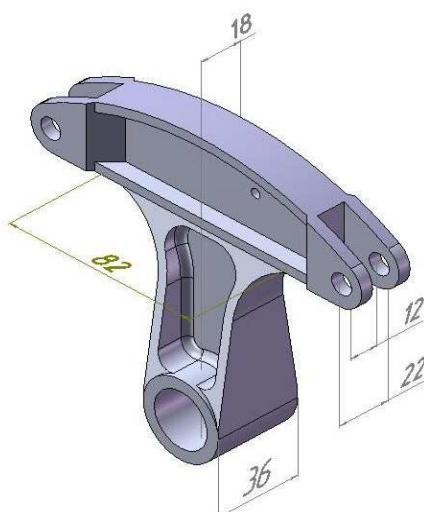


Рис. 21. Электронная модель «Качалка»

**Этап 7.** Разработка сборочной единицы «Качалка». При конструировании сборки применяется принцип построения «снизу вверх», когда сборочная единица собирается из готовых изделий. Компонентами сборочной единицы «Качалка» являются: модель детали «Качалка» (рис. 21); оригинальная деталь «Втулка распорная внутренняя» (рис. 6); стандартные (отраслевые) изделия «Подшипник» и «Втулка распорная внешняя». В отверстиях проушин устанавливаются стандартные (отраслевые) втулки с буртиком. Стандартные изделия выбираются из библиотеки программного продукта. Разработка сборки реализуется созданием

## **Разработка чертежей изделий и сборочной единицы**

Разработка чертежа выполняется в среде геометрического моделирования КОМПАС-3D. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. Сохранить модель в формате \*.stp или \*.step.
  2. Открыть сохраненный файл в КОМПАС-3Д.
  3. Сохранить файл модели с расширением m3d.
  4. Выполнить операцию построения чертежа в КОМПАС-3Д.
  5. Добавить главный вид. Остальные виды добавить с помощью команд «Виды», «Проекционные виды». Достроить

нового файла командами «Файл», «Новый» и выбором шаблона «Сборка». Активацией команды «Компонент» меню «Вставка» выбираются элементы из файла или библиотеки с фиксацией изображений в сборочном пространстве. В разделе «Стандартные сопряжения» устанавливаются типы сопряжения «Концентричность» (указывает на концентрическое расположение цилиндрических поверхностей) и «Расстояние» (кромки или выделенные поверхности располагаются на заданном расстоянии). В такой комплектации сборочная модель готова для разработки сборочного чертежа с бесчертежной деталью.

## вой единицы

необходимые разрезы, сечения.

6. Нанести размеры, заполнить основную надпись.
  7. Вставить текст «Технические требования».
  8. Выпустить спецификацию.
  9. В сборочном чертеже расставить позиции в соответствии со спецификацией.
  10. Сохранить чертеж (рис. 22).

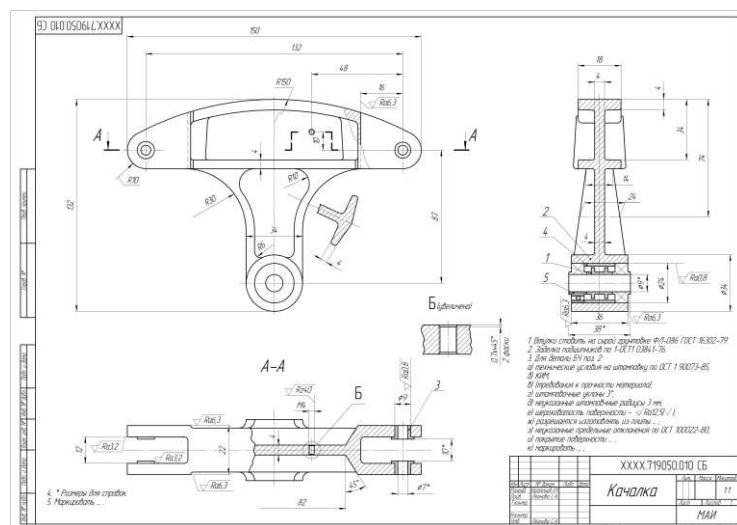


Рис. 22. Фрагмент чертежа детали «Качалка»

## Заключение

Представленная методика конструирования изделий сложных форм средствами компьютерной графики от модели до выпуска конструкторской документации позволяет приобрести навыки построения эскизов, научиться разрабатывать модель, отображать модель на плоскости, выбирать

наиболее оптимальное количество изображений, выпускать чертежи. Такой подход является важным для конструкторских специальностей технических вузов для приобретения навыков конструирования и проектирования уже на начальной стадии обучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабулин, Н.А. Построение и чтение машиностроительных чертежей / Н.А. Бабулин. - М.: Академия, 2000.
2. Бабулин, Н.А. Методические указания к оформлению чертежей изделий ЛА / Н.А. Бабулин, Т.М. Хвесюк, В.А. Андреев, Н.К. Кандалов. - М.: МАИ, 1992. - 60 с.
3. Большаков, В.П. КОМПАС-3Д для студентов и школьников. Чертение, информатика, геометрия / В.П. Большаков. - СПб.: БХВ-Петербург, 2010. - 304 с.
4. Дударева, Н.Ю. SolidWorks 2007 на примерах / Н.Ю. Дударева, С.А. Загайко. - СПб.: БХВ-Петербург, 2007.
1. Babulin, N.A. *Formation and Reading of Engineering Drawing* / N.A. Babulin. – M.: Academy, 2000.
2. Babulin, N.A. *Methodical Instructions to Formation of LA Product Drawings* / N.A. Babulin, T.M. Khvesyuk, V.A. Andreev, N.K. Kandalov. – M.: MAI, 1992. – pp. 60.
3. Bolshakov, V.P. *3D COMPASS for Students and School Children. Drawing, Informatics, Geometry* / V.P. Bolshakov. – S-Pb.: BHV-Petersburg, 2010. – pp. 304.
4. Dudareva, N.Yu. *SolidWorks 2007 by Examples* / N.Yu. Dudareva, S.A. Zagaiko. – S-Pb. – S.-Pb.: BHV-Petersburg, 2007.
5. Yendagur, A.I. *Aircraft Structure Design. Design of Parts and Units Structures: Manual* / A.I. Yendagur. – M.: MAI-PRINT, 2009. – pp. 540.
6. *Engineering and Computer Graphics: textbook and practice for applied baccalaureate* / R.R. Anamova [et al.]; under the general editorship of R.R. Anamova, S.A. Leonova, N.V. Pshenichnova. – M.: Youright, 2017. – pp. 246.
7. Kuprikov, M.Yu. *Parts Solid-state Modeling in Environment of Geometrical SolidWorks : manual* / M.Yu. Kuprikov, Yu.V. Maslov, G.K. Khotina, L.B. Nikishina. – M.: MAI, 2009.

## Сведения об авторах:

**Анамова Рушана Ришатовна**, к.т.н., доцент кафедры «Инженерная графика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), e-mail: [anamova.rushana@yandex.ru](mailto:anamova.rushana@yandex.ru).

**Леонова Светлана Александровна**, к.т.н., доцент кафедры «Инженерная графика» Московского

**Anamova Rushana Rishatovna**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Graphics”, Moscow Aircraft Institute (National Research University), e-mail: [anamova.rushana@yandex.ru](mailto:anamova.rushana@yandex.ru).

**Leonova Svetlana Alexandrovna**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Graphics”, Moscow Aircraft Institute (National Research University), e-mail: [7562902@list.ru](mailto:7562902@list.ru).

Статья поступила в редакцию 14.12.17.  
Рецензент: к.т.н., доцент МАДИ  
Рябикова И.М.

авиационного института (национального исследовательского университета), e-mail: [7562902@list.ru](mailto:7562902@list.ru).  
**Хотина Галина Константиновна**, к.т.н., доцент кафедры «Инженерная графика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), e-mail: [Khotina.galina@yandex.ru](mailto:Khotina.galina@yandex.ru).

**Khotina Galina Konstantinovna**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Graphics”, Moscow Aircraft Institute (National Research University), e-mail: [Khotina.galina@yandex.ru](mailto:Khotina.galina@yandex.ru).

УДК 681.5

DOI: 10.12737/article\_5a795ffae6f565.05474307

Е.М. Самойлова

## ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ГИБРИДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Рассматривается алгоритмизация с последующей программной реализацией обработки вихретокового сигнала при построении информационно-измерительного канала гибридной интеллектуальной системы мониторинга шлифовального станочного модуля, что позволит повысить эффективность производства путем снижения вероятности

принятия ошибочного решения и уменьшения влияния человеческого фактора.

**Ключевые слова:** интеллектуализация, распознавание образов, вихретоковый контроль, мониторинг, информационно-измерительный канал, алгоритмизация, гибридная интеллектуальная система, станочный модуль, SCADA-система.

E.M. Samoilova

## SOFTWARE-BASED REALIZATION OF INFORMATION-MEASURING CHANNEL FOR EDDY CURRENT CONTROL OF HYBRID INTELLIGENT MONITORING SYSTEM

The algorithmization with the further software-based realization of eddy current signal processing at the formation of the information measuring channel of the hybrid intelligent system for machine module monitoring is under consideration.

For the automation of control and identification of defects on racer rolling surfaces there is formed a quantitative assessment of parameters controlled on the basis of the training experiment results. In this case at the automation of the quality control system of a surface layer as a training experiment there are data obtained with the aid of the classifier formed on the basis of different alternative methods of crack detection and experts' opinion.

The operation algorithmization of an information-measuring channel for eddy current control for surface layer state identification with the formation of reference estimates is carried out; the alphabet of de-

fect classes for identification and identification itself of the defect sort allowing the decision-making regarding surface layer quality of a product and the state of a processing system with the development of recommendations to ensure quality of produce which defines an intelligent aspect of the system.

The *Amplitude* software developed may be used for the information-measuring channel realization of the hybrid intelligent system for the engineering procedure monitoring of racer grinding which will allow increasing production efficiency by means of probability decrease in wrong decision-making and human factor impact reduction.

**Key words:** intellectualization, image identification, eddy current control, monitoring, information-measuring channel, algorithmization, hybrid intelligent system, machining module, SCADA system.

### Введение

При изготовлении высокоточных изделий машино- и приборостроения дестабилизируются как сам процесс шлифования, так и результаты обработки под действием множества переменных факторов, что приводит к необходимости периодически, несколько раз в день, контролировать состояние технологической системы. Качество шлифованных поверхностей колец подшипников определяется совокупностью физико-механического состояния поверхности слоя и геометрических параметров точности.

Решить данную многопараметрическую задачу можно применением системы мониторинга с элементами интеллектуальных технологий, включая контроль параметров качества деталей и заготовок с идентификацией дефекта поверхности качения, используя последующую обработку данных измерений с поиском управляющего решения по режиму обработки и комплексу ремонтно-восстановительных работ [1-3].

## Алгоритмизация получения решения для обеспечения качества деталей подшипников при организации информационно-измерительного канала вихретокового контроля

Аппаратурное обеспечение измерений и контроля геометрических параметров точности осуществляется приборами, широко реализованными на практике. Для контроля физико-механического состояния поверхностного слоя высокоточных деталей изготавливаются специализированные устройства и применяются различные методы неразрушающего контроля: визуальный, капиллярный, магнитный, вихретоковый, метод травления и ультразвуковой.

В связи с тем что распознавание образов является одним из направлений искусственного интеллекта, а идентификация образа дефекта по сигналу вихретокового преобразователя (ВТП) представляет собой на сегодняшний момент визуальный контроль на основе сканограммы детали с применением специального классификатора, осуществляемый обученным персоналом, который принимает решение о качестве поверхностного слоя, наличии и типе дефекта, необходима методика автоматизированного неразрушающего контроля поверхностей качения колец подшипников по вихретковым сигналам [4; 5].

Применение автоматизированного вихреткового метода контроля, являющегося относительно новым с точки зрения компьютерной обработки сигнала, удовлетворяет основным требованиям информационно-измерительного канала системы интеллектуального мониторинга по информативности и выявлению основных дефектов поверхностей качения, быстродействию и встраиваемости [6; 7].

Автоматизация идентификации дефектов поверхностей качения колец подшипников – задача, решение которой представляет собой важный компонент интеллектуальной составляющей мониторинга, одной из характерных особенностей которого является применение вихретковых приборов как неразрушающих средств

контроля. Предыдущие исследования показали, что вихретковый сигнал зависит от вида дефекта, значения удельной электрической проводимости в точках с дефектом и без него различны. Это позволяет обосновать классификацию дефектов по сигналам с ВТП.

Для автоматизации процесса контроля и идентификации необходимо сформировать количественную оценку контролируемых параметров, что возможно на основе результатов обучающего эксперимента, когда происходит преобразование данных измерительных каналов в собственных алгоритмах функционирования. В нашем случае для автоматизации системы контроля качества поверхностного слоя обучающим экспериментом становятся данные, полученные с помощью сформированного на основе различных альтернативных методов дефектоскопии классификатора КЗ-2005 и мнения экспертов [7; 8].

Во время обучающего эксперимента - накопления базы данных (БД) и базы знаний (БЗ) - в соответствии с методом эталонов определяется алфавит классов дефектов для идентификации, производится сравнение значений массива данных с эталонными значениями и осуществляется формирование признаков идентификации и эталонных оценок дефектов для последующего принятия решения по анализу образной информации, что и определяет интеллектуальный аспект системы.

Данная методика разделена на два этапа: проведение обучающего эксперимента с формированием эталонных оценок и идентификация дефекта по сравнительному анализу с последующим принятием решения по качеству поверхностного слоя изделия и состоянию технологического процесса (рис. 1).

### Формирование количественной оценки контролируемых параметров на основе результатов обучающего эксперимента

В качестве комплекса автоматизированных аппаратных средств, способных

измерять и анализировать значения контролируемых признаков, используется

совместно разработанный сотрудниками предприятий г. Саратова и СГТУ универсальный автоматизированный прибор вихревокового контроля ПВК-К2М, включенный в Госреестр средств измерений (№ 26079-03). Прибор работает по методу контроля, основанному на анализе взаимодействия электромагнитных полей - внешнего и вихревых токов, которые наводятся возбуждающей катушкой в объекте контроля; порог чувствительности  $D = 4,8 \text{ мкм}$ , чувствительность  $S = 0,07 \text{ ед. шкалы на } 1 \text{ мкм глубине}$

бини дефекта стандартного образца. Он является наиболее эффективным на финишных операциях и позволяет получать достоверные результаты при контроле независимо от скорости движения объектов. Применение измерительного комплекса на основе ПВК-2М дает возможность классификации значений контролируемых параметров по четырехбалльной системе: от высокого качества (5 баллов) до неудовлетворительного (2 балла), соответствующего браку.



Рис. 1. Алгоритмизация идентификации дефектов шлифования деталей по интеллектуальному анализу образной информации

Для автоматизации процесса контроля и идентификации сформирована количественная оценка контролируемых параметров для идентификации путем сравнения значений массива данных с эталонными значениями классификатора на основе результатов обучающего эксперимента, когда происходит преобразование данных измерительных каналов в собственных алгоритмах функционирования, определен алфавит классов дефектов для идентификации состояния станочного модуля в составе 10 дефектов поверхностей

качения деталей подшипников (рез, кольцевой прижог, прижог штриховой периодический, металлическая трещина (закалочная), забоина, металлографическая трещина, пятнистый прижог, пятна троостита, локальный прижог, металлическое обеднение) и набор 4 параметров  $k$ , характеризующих каждый из этих основных дефектов.

Предлагаемые ранее методики идентификации дефектов поверхностного слоя не позволяли определять обнаруженные неоднородности однозначно, а то и вовсе

не позволяли выявлять локальные дефекты

поверхности [4; 9].

### **Алгоритмизация автоматизированной локализации и распознавания дефекта поверхности качения**

Для автоматизированной локализации и распознавания дефекта разработан алгоритм, представленный на рис. 2. Он предусматривает применение двух методик локализации для идентификации дефекта и принятия решения о качестве поверхности: 1) на основе оценки среднего квадратического отклонения (СКО) сигнала при разбиении общего массива значений на несколько сегментов (порядка 20), когда анализируется разница значений СКО в одном или нескольких сегментах

относительно среднего или сигнала без дефектов; 2) по методу отсечения заведомо качественных участков поверхности детали из дальнейшего анализа с целью повышения эффективности процесса идентификации дефекта на этапе распознавания, когда детали 1 и 2 классов автоматически признаются годными (анализ проводится только для деталей подшипников 3 и 4 классов с целью повышения эффективности дальнейшего процесса идентификации дефекта).

### **Программная реализация информационно-измерительного канала гибридной интеллектуальной системы мониторинга технологического процесса шлифовальной обработки колец подшипников**

Разработано специализированное программное обеспечение с применением интегрированной среды SCADA-системы TRACE MODE 6 (рис. 3) для реализации предложенного алгоритма (рис. 2) в рамках построения информационно-измерительного канала вихревокового контроля гибридной интеллектуальной системы мониторинга в режиме реального времени для автоматической локализации и распознавания дефектов поверхностей качения [10].

Программа осуществляет сбор, хранение и анализ массивов амплитудной и фазовой составляющих вихревокового сигнала мониторинга технологического процесса производства подшипников в режиме реального времени, полученных в виде цифровых данных с помощью универсального автоматизированного прибора вихревокового контроля ПВК-К2М, включенного в Госреестр средств измерений (№ 26079-03).

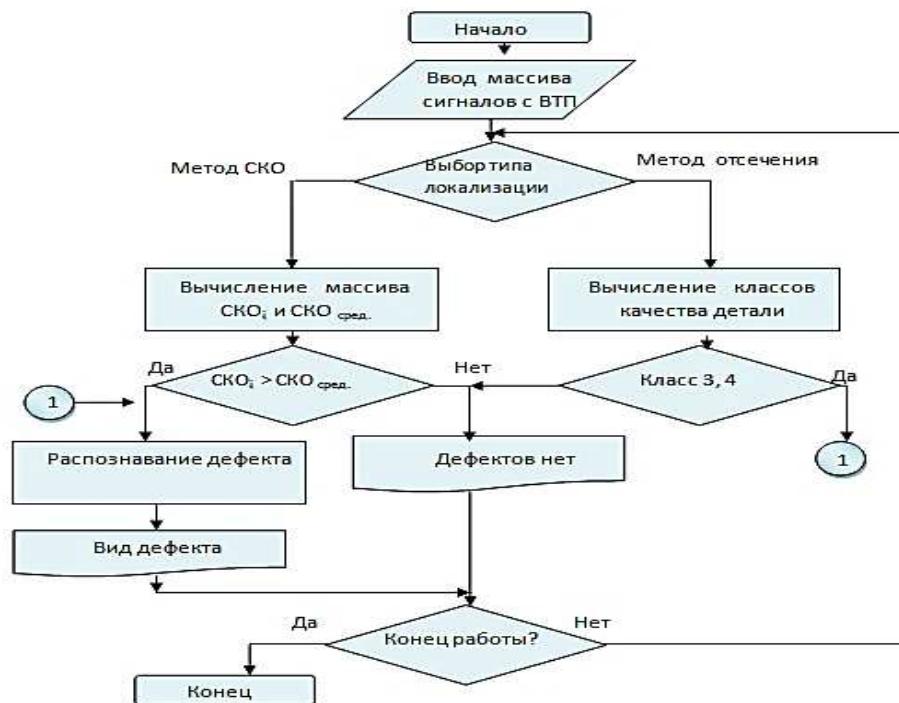


Рис. 2. Алгоритм автоматизированной локализации и распознавания дефекта

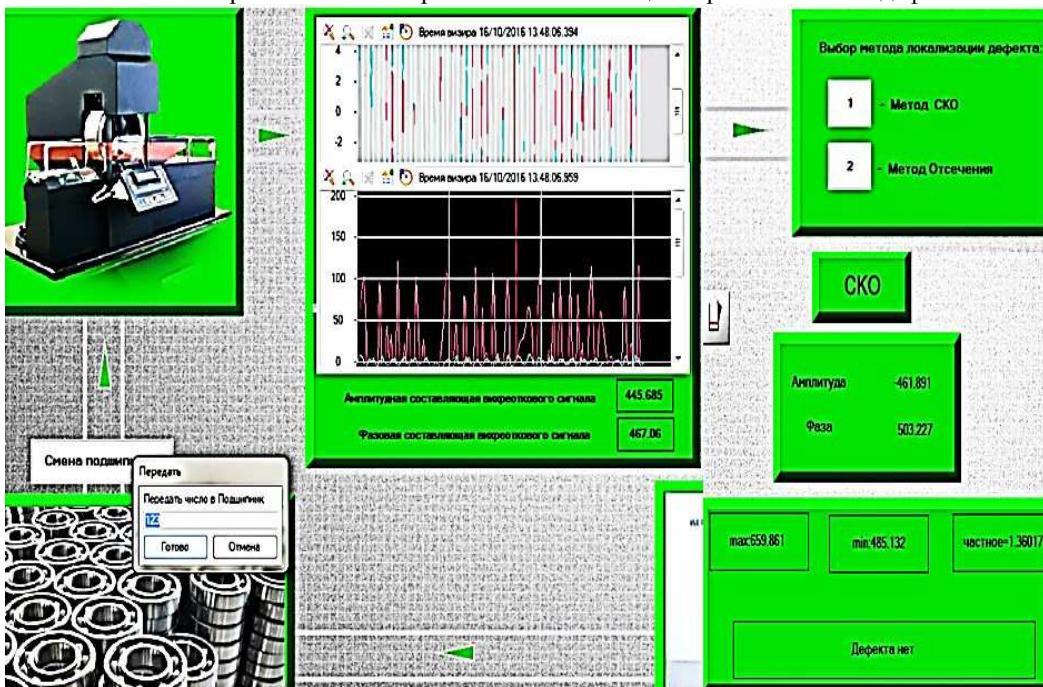


Рис. 3. Рабочий экран программы (по умолчанию - метод СКО)

Основной рабочий экран программы *Amplituda* (рис. 3) содержит окно ручного ввода параметров детали для анализа (в рабочем режиме выбор детали для анализа производится автоматически), блок графиков для визуализации в режиме реального времени амплитудной и фазовой составляющих вихревого сигнала мониторинга, а также панель выбора методики анализа, который возможен в ручном ре-

жиме и автоматически. Массивы значений для каждой детали (порядка 50 000) автоматически заносятся в БД системы мониторинга.

Дополнительные рабочие экраны программы содержат результаты расчета, анализа и визуализации вихревого сигнала как на основе метода СКО (рис. 4), так и по методу отсечения (рис. 5).

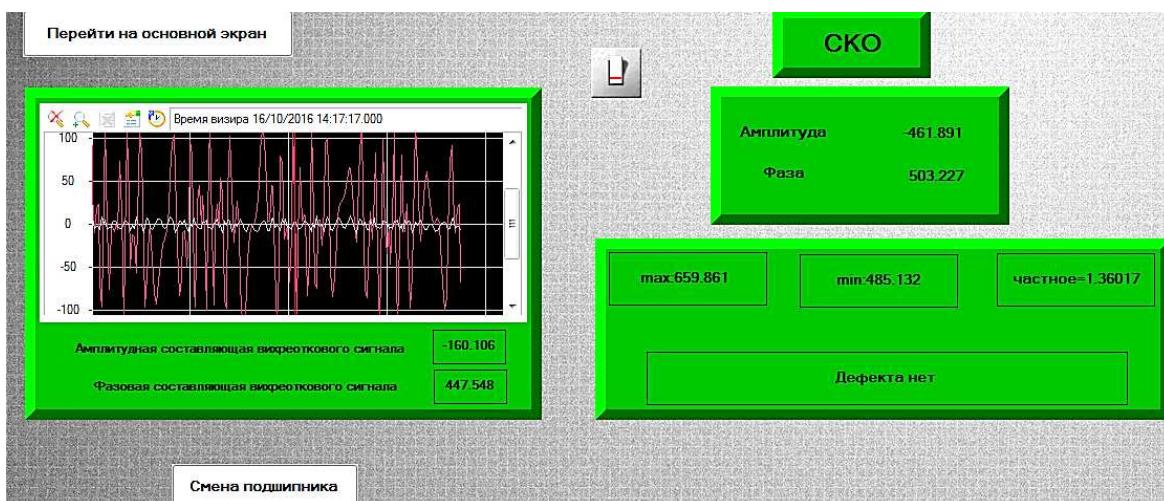


Рис. 4. Пример обработки амплитудной и фазовой составляющих вихревого сигнала по методу СКО и принятия решения о качестве поверхности



Рис. 5. Пример обработки амплитудной и фазовой составляющих вихревого сигнала по методу отсечения и принятия решения о качестве поверхности

Результаты анализа отражаются в виде численных значений на основном и дополнительных рабочих экранах, в виде балльной оценки, а также в виде рекомендаций для принятия решения о качестве поверхности детали подшипника. Выход-

ные значения автоматически заносятся в БД единого информационного пространства интеллектуальной системы мониторинга и могут применяться для дальнейшей обработки.

### Заключение

Разработанное программное обеспечение *Amplituda*, прошедшее государственную регистрацию в Реестре программ для ЭВМ 15.03.17 (№ 2017613316), может применяться для реализации информационно-измерительного канала гибридной интеллектуальной системы мониторинга

технологического процесса шлифовальной обработки колец подшипников. Это позволит повысить эффективность работы за счет снижения вероятности принятия ошибочного решения и уменьшения влияния человеческого фактора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гейценредер, А.А. Мониторинг состояния станичной системы токарной обработки при интел-

- лектуальном управлении: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / А.А. Гейценредер. - Ростов н/Д, 2006. - 18 с.
2. Игнатьев, С.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции: монография / С.А. Игнатьев, В.В. Горбунов, А.А. Игнатьев. - Саратов: Изд-во СГТУ, 2009. - 160 с.
  3. Самойлова, Е.М. Интеллектуальный анализ и обработка данных качества шлифовальной обработки деталей с применением нейросетевых технологий / Е.М. Самойлова // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 1 (54). - С. 178-184.
  4. Волынская, О.В. Автоматизация вихревокового контроля неоднородности структуры поверхностного слоя деталей подшипников при мониторинге процесса шлифования: автореф. дис. ... канд. техн. наук / О.В. Волынская. - Саратов, 2002. - 16 с.
  5. Тяпаев, С.В. Реализация сплошного неразрушающего контроля бездефектности поверхностного слоя деталей в производстве буксовых подшипников для подвижного железнодорожного состава / С.В. Тяпаев, Н.Г. Снитко // Вестник ВНИИЖТ. - 2013. - № 1. - С. 35-40.
- 
1. Geitsenreder, A.A. *Machining System Monitoring for Turning at Intelligent Control*: self-abstract of the Can. Eng. Degree thesis: 05.03.01. / A.A. Geitsenreder. – Rostov-upon-Don. 2006. – pp. 18.
  2. Ignatiev, S.A. *Engineering Procedure Monitoring as Element of Product Quality Control System*: monograph / S.A. Ignatiev, V.V. Gorbunov, A.A. Ignatiev. – Saratov: SSTU Publishers, 2009. – pp. 160.
  3. Samoilova, E.M. Intelligent analysis and quality data processing at parts grinding using neuro-net techniques / E.M. Samoilova // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. – No.1 (54). – pp. 178-184.
  4. Volynskaya, O.V. *Eddy Current Control Automation of Surface Layer Structure Heterogeneity in Bearing Parts at Grinding Monitoring*: self-abstract for Can. Eng. degree / O.V. Volynskaya. – Saratov, 2002. – pp. 16.
  5. Tyapaev, S.V. Realization of solid nondestructive control of zero-defects in parts surface layer at manufacturing axlebox bearings for rolling-stock / S.V. Tyapaev, N.G. Snitko // *Bulletin of RRIRT*. – 2013. – No.1. – pp. 168.
- 
6. Гаврилов, А.В. Гибридные интеллектуальные системы / А.В. Гаврилов. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 168 с.
  7. Горбунов, В.В. Автоматизация вихревокового контроля поверхностного слоя деталей подшипников с применением технологии нейронных сетей / В.В. Горбунов, Е.М. Самойлова, А.А. Игнатьев // Изв. высш. учеб. заведений. Поволжский регион. Технические науки. - 2016. - № 4. - С. 115-123.
  8. Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. - М.: Машиностроение, 1978. - 240 с.
  9. Игнатьев, А.А. Автоматизация распознавания дефектов шлифовальных поверхностей деталей подшипников при вихревоковом контроле с обоснованием выбора вейвлета / А.А. Игнатьев, О.С. Шумарова, Е.М. Самойлова // Изв. высш. учеб. заведений. Поволжский регион. Технические науки. - 2015. - № 1. - С. 121-132.
  10. Обработка и анализ вихревоковых сигналов мониторинга технологического процесса производства подшипников (Amplituda) / Самойлова Е.М., Цыбина Т.В., Игнатьев С.А. - № 2017613316; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 15.03.17.
- 
6. Gavrilov, A.V. *Hybrid Intelligent Systems* / A.V. Gavrilov. – Novosibirsk: NSTU Publishers, 2003. – pp. 168.
  7. Gorbunov, V.V. *Automation of Surface Layer Eddy Current Control in Bearing Parts Using Neuro-Net Techniques* / V.V. Gorbunov, E.M. Samoilova, A.A. Ignatiev // College Publishing House. Povolzhsky region. Engineering Sciences. – 2016. – No.4. – pp. 115-123.
  8. Birger, I.A. *Engineering Diagnostics* / I.A. Birger. – M.: Mechanical Engineering, 1978. – pp. 240.
  9. Ignatiev, A.A. *Automation of Defect Identification in Bearing Parts Grinding Surfaces at Eddy Current Control with Substantiation of Wavelet Choice* / A.A. Ignatiev, O.S. Shumarova, E.M. Samoilova // College Publishing House. Povolzhsky Region. Engineering Sciences. – 2015.. – No.1. – pp. 121-132.
  10. *Processing and Analysis of Eddy Current Signals of Engineering Process Monitoring at Bearing Manufacturing (Amplitude)* / Samoilova E.M., Tsybina T.V. Ignatiev S.A. – No. 2017613316; registered in Register of Computer Software 15.03.17.

*Статья поступила в редакцию 15.01.18.*

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

#### Сведения об авторах:

**Самойлова Елена Михайловна**, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического уни-

**Samoilova Elena Mikhailovna**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Automation, Control, Mechatron-

верситета им. Ю.А. Гагарина, тел. (8452) 99-86-37, e-mail: [Helen\\_elenka@mail.ru](mailto:Helen_elenka@mail.ru).

ics”, Gagarin State Technical University of Saratov, e-mail: [Helen\\_elenka@mail.ru](mailto:Helen_elenka@mail.ru).

## Металлургия и материаловедение

УДК 621.438-226.2:678:539.4

DOI: 10.12737/article\_5a795ffb3ec612.3126031

Б.Е. Низовцев, О.Б. Сильченко,  
М.В.Силуянова, А.А. Корнилов, Б. Мыктыбеков

### НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОР

Рассмотрено применение вероятностных моделей деформирования и разрушения композиционных материалов с хрупкой матрицей с учетом макродеформаций для квазиоднородного материала с микронеоднородностью. Для оценки эффективности предложенных моделей деформирования и разрушения хрупкого керамического материала и отработки методики на примере лопатки турбины

высокого давления малоразмерного газотурбинного двигателя решена контактная задача.

**Ключевые слова:** вероятностная модель деформирования, керамические композиционные материалы, контактная задача, напряженно-деформированное состояние, технологические поры.

V.Z. Nizovtsev, O.B. Silchenko, M.V. Siluyanova, A.A. Kornilov, B. Myktybekov

### SOME MODELS OF CERAMIC COMPOSITE MATERIALS STRESS-STRAIN STATE ASSESSMENT TAKING INTO ACCOUNT TECHNOLOGICAL PORES

Composite materials with a brittle matrix are of interest not only as a matrix material, but also as an independent structural material. The technology of manufacturing these materials introduces imperfections in the form of pores which affect the character of parts deformation at the early stages of operation. That is why in the paper there are offered simulators taking into account the peculiarities of these materials and their impact upon product working capacity is assessed. The process of a slow crack growth (SCG) in porous matrix materials with natural heterogeneities at

special ways of loading for the development of methods to define short-term and long-term strength of parts made of matrix material is described. In the paper there are used contact problems for the investigation of ceramic blades for high-temperature turbines. Complex conditions of such blades loading create prerequisites for simulators use which are analyzed in the paper taking into account material porosity.

**Key words:** probabilistic model of deformation, ceramic composite materials, contact problem, stress-strain state, technological pores.

#### Введение

В настоящее время идет интенсивное освоение композиционных материалов с хрупкой матрицей, в которых в качестве материала матрицы используются стеклокерамика, керамика, интерметаллиды и др. материалы. Некоторые интерметаллиды представляют интерес не только в качестве матричного материала в различных композициях, но и как самостоятельный конструкционный материал.

Одними из основных особенностей этих материалов являются присущие им хрупкость и неприемлемый для конструкторов разброс механической прочности материала (модуль Вейбулла порядка 5–7), обусловленный прежде всего качеством

используемого сырья и принятой технологией изготовления, в частности недостаточной её отработанностью. В результате в изделиях из этих материалов уже сразу после их изготовления можно обнаружить несовершенства в виде пор, которые скаживаются на характере их деформирования на самых ранних стадиях эксплуатации.

В связи с этим чрезвычайно актуальна разработка математических моделей, каким-то образом учитывающих данные особенности хрупких материалов, для оценки их влияния на работоспособность изделия. Одним из недостаточно изученных и описанных эффектов при использовании этих материалов при высоких тем-

пературах является их медленное разрушение, медленный рост трещины или внутренних повреждений, который длится до тех пор, пока магистральная трещина не достигнет своего критического размера. Как только её размеры достигают критической величины, происходит катастрофически быстрое разрушение детали. Поэтому чрезвычайно важно по возможности точно описать процесс медленного роста трещины (МРТ) в хрупких материалах с естественными неоднородностями (пористость, несовершенства, инородные включения и т.д.) при специальных способах нагружения для разработки приемлемых методов предсказания кратковременной и длительной прочности деталей из них.

Наконец, так же как и монолитный материал, композиционные материалы на хрупких матрицах (керамические компо-

зиционные материалы, интерметаллидные композиционные материалы, композиционные материалы на основе хромовых матриц и т.д.) отличаются тем, что в материале матрицы всегда присутствуют поры и/или инородные включения, технологические несовершенства. Распределение пор и инородных включений, а также рост пористости в процессе деформирования определяют упругие характеристики материала матрицы. В связи с этим при аналитическом предсказании характеристик композиционных материалов необходимо учитывать указанные особенности и иметь в распоряжении более точные данные о характеристиках материала матрицы и сведения о росте трещин в нём, что может быть достигнуто применением различных вероятностных моделей.

### Применение вероятностных моделей

Одними из наиболее актуальных задач применения вероятностных моделей служат контактные задачи. На данный момент активно ведутся исследования по разработке керамических лопаток для высокотемпературных турбин. Сложные условия нагружения таких лопаток требуют разработки математической модели, позволяющей достаточно точно определять все механические и упругие свойства

$$\sigma = \frac{\sigma}{K} + \alpha T, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{s_{ij}}{2G}, \quad e_{ij} = \left( \frac{\sigma}{K} + \alpha T \right) \delta_{ij} + \frac{s_{ij}}{2G} \quad (i=1,2,3; j=1,2,3). \quad (1)$$

В выражениях (1) отдельно выделены части деформации, обусловленные гидростатическим давлением  $\sigma$ , температурными эффектами и, наконец, девиаторными составляющими напряжения  $s_{ij}$ . Две независимые постоянные  $K$  и  $G$  характеризуют упругое деформирование изотропной хрупкой матрицы. Температурное расширение характеризуется коэффициентом линейного расширения  $\alpha$ . В приведенных соотношениях учитывается эффект влияния температуры на механические и физические характеристики материала матрицы. Действительно, характеристики материала предполагаются зависящими от

ортотропных керамических композиционных материалов.

Во многих исследованиях полагают, что материал матрицы является изотропным и упругим и поэтому обобщенный закон Гука пригоден для описания его поведения при температурных и механических воздействиях. В этом случае обобщенный закон Гука удобно записать в следующем виде:

$$\text{уровня температуры, т.е. } K = K(T), G = G(T) \text{ и } \alpha = \alpha(T).$$

Кроме того, благодаря введенным параметрам  $\varepsilon_{ij}$  и  $e_{ij}$  соотношениями (1) учитывается влияние технологических остаточных напряжений  $\sigma_{ij}^{res}$  и деформаций  $\varepsilon_{ij}^{res}$  на начальном этапе деформирования.

Соотношения (1) могут быть использованы для оценки напряженно-деформированного состояния изделий из монолитной керамики. Однако, как было отмечено выше, уже на стадии изготовления материала матрицы может содержать дефекты в виде пор, инородных включений, технологических несовершенств. Это

обстоятельство было предметом многочисленных исследований [1 - 3].

В наших исследованиях зависимость между макронапряжениями  $\langle \sigma_{ij} \rangle$  и макродеформациями  $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$  для квазиодно-

$\Delta \langle \varepsilon \rangle = \Delta \langle \sigma \rangle / K^* + \alpha^* \Delta T, \quad \Delta \langle \varepsilon_{ij} \rangle = \Delta \langle s_{ij} \rangle / 2G^*$  (2)

относительно среднего давления  $\langle \sigma \rangle$ , средней деформации  $\langle \varepsilon \rangle$  и компонентов тензоров интенсивности напряжений  $\langle s_{ij} \rangle$  и интенсивности деформаций  $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ . Здесь параметры  $K^*$ ,  $G^*$  и  $\alpha^*$  являются эффективными значениями объёмного модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента линейного расширения изотропного материала с включениями, в частности, и изотропного упругопористого материала. Согласно теории изотропных двухфазных гранулированных композиционных материалов, эффективные характе-

$$\begin{aligned} G^* &= \langle G \rangle [1 - A(f, h)]; & K^* &= \langle K \rangle [1 - A(F, H)]; \\ A(x, y) &= p(1-p)xy^2 / [1 + xy(1-2p) - x^2y^2(p(1-p))]; & & (3) \\ f &= 2(4-5\langle \nu \rangle) / [15(1-\langle \nu \rangle)]; & h &= (G_{BK} - G) / \langle G \rangle; \\ F &= (1+\langle \nu \rangle) / [3(1-\langle \nu \rangle)]; & H &= (K_{BK} - K) / \langle K \rangle; \quad \langle X \rangle = pX_{BK} + (1-p)X. \end{aligned}$$

Здесь  $p$  – объёмное содержание инородных включений с характеристиками  $G_{BK}$  и  $K_{BK}$ ;  $G$  и  $K$  – характеристики бездефектной керамики;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

$$\alpha^* = \alpha + (\alpha_{BK} - \alpha)\alpha_k;$$

$$E^* = 3G^* / (1 + G^* / K^*);$$

Приведенные соотношения (3), (4) могут быть использованы также для оценки характеристик изотропного упругопористого тела с пористостью  $p$ . В этом случае следует принять, что соответству-

$$\begin{aligned} G^* &= \langle G \rangle [1 - A'(f)]; & K^* &= \langle K \rangle [1 - A'(F)]; & \alpha^* &= \alpha(K^* / K); \\ A'(x) &= px / [1 - p + x(1-2p) - x^2p]; & & (5) \\ f &= 2(4-5\langle \nu \rangle) / [15(1-\langle \nu \rangle)]; & F &= (1+\langle \nu \rangle) / [3(1-\langle \nu \rangle)]; & \langle X \rangle &= (1-p)X. \end{aligned}$$

Таким образом, согласно теории изотропных упругопористых сред [см. соотношения (5)], эффективные модуль упругости  $E^*$ , модуль сдвига  $G^*$  и коэффициент Пуассона  $\nu^*$  квазизотропного кера-

родного материала матрицы с микроповреждениями или инородными включениями (с их объёмным содержанием  $p$ ) записывается в приращениях

ристики (модуль упругости  $E^*$ , модуль сдвига  $G^*$ , объёмный модуль упругости  $K^*$ , коэффициент Пуассона  $\nu^*$ , коэффициент линейного расширения  $\alpha^*$  и др.) квазиоднородного материала матрицы можно найти через соответствующие характеристики составных частей и их объёмное содержание. Например, статистическими методами [1] установлено, что модуль сдвига  $G^*$  и объёмный модуль упругости  $K^*$  материалов с гранулированными включениями определяются из следующих соотношений:

Для определения коэффициента линейного расширения в материале с инородными включениями можно использовать соотношение [2]

$$\alpha_k = (K - K^*) / (K - K_{BK}). \quad (4)$$

$$\nu^* = (1 - 2G^* / K^*) / [2(1 + G^* / K^*)].$$

ющие характеристики включения равны нулю, т. е.  $G_{BK} = 0$ ,  $K_{BK} = 0$ ,  $\alpha_{BK} = 0$ . Тогда соотношения (3), (4) преобразуются к виду

мического материала, содержащего поры (пористость  $p$ ), можно найти через упругие характеристики беспористой части. В наших исследованиях будут использованы соотношения, приведенные в [4], которые

после некоторых простых преобразований можно записать в удобном для последующих преобразований виде:

$$K^* = K(1-p)^2 / A_k; \quad A_k = 1 + p(K/G)(0,75 - G/K); \quad (6)$$

$$G^* = G(1-p)^2 / A_G; \quad A_G = 1 - p(0,75 - G/K)/(2,25 + 2K/G); \quad (7)$$

$$G = E/2(1+\nu); \quad K = E/(1-2\nu).$$

Здесь  $E$ ,  $G$ ,  $K$  и  $\nu$  – модуль упругости, модуль сдвига, объёмный модуль упругости и коэффициент Пуассона монолитного керамического материала, не содержащего поры.

$$\langle \varepsilon \rangle = \langle \sigma \rangle / K^* + \alpha^* T, \quad \langle \varepsilon_{ij} \rangle = \langle s_{ij} \rangle / 2G^*, \quad (8)$$

могут быть использованы для оценки напряженно-деформированного состояния изделий из монолитной керамики, содержащей заданные (неизменяющиеся) технологические несовершенства в виде пор, инородных включений. При этом должны быть использованы экспериментально полученные характеристики материала ( $G^*$ ,  $K^*$ ,  $\alpha^*$ ), соответствующие их средним значениям для принятого технологического процесса. Если используются расчетные характеристики материала (3)–(6), то они должны быть предварительно экспериментально подтверждены.

Появление и развитие повреждений в монолитной керамике исследовалось двумя методами: на основе энергетических подходов и на базе механики разрушения [5]. Особенностью результатов, полученных на основе этих подходов, является то, что развитие повреждений не зависит от размеров множества очагов поврежденности [5], а определяется развитием одной из наиболее опасных трещин. В настоящих исследованиях анализ появления и развития повреждений в монолитной керамике проводится на основе методов механики упругопористых сред, разработанных М. Био [3], и статистически распределенных предельных деформаций.

При определенных нагрузках в наиболее слабых микрообъемах керамического материала могут иметь место микроразрушения, которые уменьшают несущую часть материала и ведут к перераспределению микронапряжений в окрестности повреждений. Если в керамическом материале нет поврежденности, размеры которой определяют несущую способность кон-

струкции в целом, то можно допустить, что в нём имеет место случайное начальное распределение субмикротрещин. Это условие, а также сложный характер распределения напряжений и деформаций в неоднородных средах позволяют моделировать единичные микроповреждения в керамическом материале квазисферическими порами [6]. В качестве условия появления единичного микроразрушения в точке хрупкой керамики в виде квазисферической поры принимается достижение в микрообъеме расчетной величиной главной деформации  $\varepsilon_1$  максимально допустимого значения  $\varepsilon_B$ :  $\varepsilon_1 = \varepsilon_B$ .

Инвариантность используемого критерия разрушения относительно начальной поврежденности не даёт оснований принять какую-либо определенную ориентацию единичного микроразрушения, т.е. отдать предпочтение какой-нибудь иной форме микроповреждений, чем квазисферическая. Поэтому распределение единичных микроразрушений в керамическом материале принимается случайным, удовлетворяющим условиям статистической однородности и изотропии, что является основанием возможности применения механики упругопористых сред при описании поведения керамического материала на нелинейном участке деформирования.

Зависимость между приращениями макронапряжений  $\langle \sigma_{ij} \rangle$  и макродеформаций  $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$  для квазиоднородного керамического материала с микроповреждениями, который характеризуется пористостью:

стью  $p$ , описывается системой уравнений (2).

Наличие микроповреждений (пористости  $p$ ) приводит к тому, что реальные значения компонент напряжений  $\langle\langle \sigma_{ij} \rangle\rangle$

$$\begin{aligned} \langle\langle t_{ij} \rangle\rangle &= \langle t_{ij} \rangle / (1-p); \quad \langle\langle \sigma \rangle\rangle = \langle \sigma \rangle / (1-p); \\ \langle\langle s_{ij} \rangle\rangle &= \langle s_{ij} \rangle / (1-p); \quad \langle\langle s_i \rangle\rangle = \langle s_i \rangle / (1-p). \end{aligned} \quad (9)$$

Соотношения (9) являются среднестатистическими и реализуются, как правило, в условиях однородного напряженного состояния и однородного распределения повреждений. Зависимости (9) не учитывают реальной концентрации напряжений в окрестности наиболее опасной поврежденности. Они определяют среднюю концентрацию напряжений по среднестатистическому живому сечению материала. Некоторые результаты расчетных исследований характера распределения напряжений в окрестности случайно расположенных пор при растяжении тел призматической формы [8] показывают, что при достаточно равномерном распределении пор характер напряженности также является однородным. Взаимное влияние пор наблюдается только при достаточно близком их расположении. Поэтому в наших последующих построениях используется предположение, что все начальные повреждения в равной мере оказывают влияние

$$\langle \varepsilon_1 \rangle = \langle\langle \sigma_1 \rangle\rangle / E^* = \langle \sigma_1 \rangle / E^* (1-p) \geq \varepsilon_B. \quad (10)$$

Выполнение условия (10) приводит к развитию пор, повышению относительной пористости  $p$  рассматриваемой среды и, следовательно, к дальнейшим изменениям характеристик материала, в частности к повышению его податливости за счет снижения приведенного модуля упругости  $E^*$ .

Предполагается, что для материала с повреждениями параметр предельной прочности  $\sigma_b$ , соответствующий предельной деформации  $\varepsilon_B$ , является случайной функцией координат, обусловленной фактическим распределением в теле микроповреждений

$$P(\sigma_B \leq \langle\langle \sigma_1 \rangle\rangle) = F(\langle\langle \sigma_1 \rangle\rangle), \quad F(\langle\langle \sigma_1 \rangle\rangle) = 1 - \exp \left\{ -(V/V_0)[(\langle\langle \sigma_1 \rangle\rangle - \sigma_0)/\sigma_u]^\alpha \right\}. \quad (11)$$

Здесь параметры  $V$  и  $V_0$  являются объемом керамического материала в исследуемом образце и объемом представи-

твленного (эталонного) образца из керамического материала, для которого определены механические характеристики -  $K$ ,  $G$  и  $\alpha$  [см. соотношения (6)] и параметры

связаны с макронапряжениями  $\langle\langle \sigma_{ij} \rangle\rangle$ , осредненными по неразрушенной части керамического материала в упругопористой среде, зависимостями на реальный уровень осредненных по живому сечению значений напряжений  $\langle\langle \sigma_{ij} \rangle\rangle$  в среде с микроповреждениями. Далее можно предположить, что с ростом нагрузки, а следовательно, и осредненных значений напряжений  $\langle\langle \sigma_{ij} \rangle\rangle$  материал может получить дополнительные микроповреждения, обусловленные тем, что с некоторой вероятностью в нем возможны разрушения. В выполненной работе предполагается, что указанные дополнительные микроразрушения происходят в некотором микрообъеме неразрушенной части хрупкой керамики. В соответствии с (8) разрушения в рассматриваемом объеме происходят тогда, когда величина достигнутой на  $k$ -м шаге нагружения главной деформации  $\langle \varepsilon_1 \rangle$  превосходит критическое значение, равное предельной деформации хрупкой керамики  $\sigma_b$ , т.е. если выполняется условие

повреждений. Допускается, что плотность распределения вероятностей  $f(\sigma_B)$  случайной предельной функции  $\sigma_B$  представляет собой асимметричную и ограниченную снизу кривую плотности вероятностей. Для анализа возможного разрушения керамики принимается конкретная форма статистической модели хрупкого разрушения [6] - трехпараметрическое распределение Вейбулла. В описанных условиях можно использовать соотношения

тального (эталонного) образца из керамического материала, для которого определены механические характеристики -  $K$ ,  $G$  и  $\alpha$  [см. соотношения (6)] и параметры

распределения Вейбулла. Их отношение отражает влияние масштабного фактора. Параметр  $\sigma_0$  – пороговое значение прочности керамического материала с начальной пористостью  $p_0$ ,  $\sigma_u$  – параметр масштаба и  $\chi$  – параметр (модуль Вейбулла) рассеяния. Если до выполнения соотношения (10) керамический материал имел некоторую начальную пористость  $p_0$ , то функция  $F(<<\sigma_1>>)$  в этом случае соответствует относительному содержанию беспористой части керамического материала, в которой действующее осредненное главное напряжение  $<<\sigma_1>>$  не превосходит соответ-

ствующего предела прочности  $\sigma_B$ . Более того, предполагается, что никакого развития пор и микроразрушений не будет наблюдаться, если осредненное главное напряжение  $<<\sigma_1>>$  не превзойдет порогового значения прочности  $\sigma_0$ . Это означает, что начальная пористость  $p_0$  керамического материала и пороговое значение прочности  $\sigma_0$  в распределении Вейбулла (11) непосредственно связаны между собой. При этом указанная зависимость в соответствии с условием (10) записывается в виде

$$<\sigma_B>/E^*(p_0)(1-p_0) \leq \sigma_0/E. \quad (12)$$

Если средняя прочность  $<\sigma_B>$  керамического материала и пороговое значение прочности  $\sigma_0$  в распределении Вейбулла известны, то соотношение (12) совместно с равенствами (2) и (6) является уравнением для определения начальной пористости  $p_0$  керамического материала. Наоборот, если известны начальная пористость  $p_0$  и

$$p_0 = (1 - \sigma_0 / <\sigma_B>) / \{1 + (\sigma_0 / <\sigma_B>)(1 + 7\nu)(3 - \nu) / [2(13 + \nu)]\}. \quad (12a)$$

В соответствии с (12a) можно утверждать, что чем больше отличие порогового значения прочности  $\sigma_0$  от средней прочности  $<\sigma_B>$  керамического материала, тем больше начальная пористость  $p_0$ . В частности, при  $\sigma_0$ , стремящемся к нулю, начальная пористость  $p_0$  приближается к единице, т. е. в этом случае керамический материал как бы полностью поврежден. В практике применения распределения Вейбулла для оценки прочности керамических материалов зачастую принимают, что пороговое значение  $\sigma_0$  в распределении (11) равно нулю. Такое предположение не может быть принято в рамках рассматриваемой здесь модели. Таким образом, соотноше-

$$[(p - p_0) / (1 - p_0)]^\theta = F(<<\sigma_1>>). \quad (13)$$

Здесь  $p_0$  – параметр, характеризующий начальное (технологическое) содержание пор в керамическом материале, а  $\theta$  – параметр, характеризующий степень влияния изменения пористости  $p$  на скорость роста повреждений. При  $<<\sigma_1>>$ , меньшем  $\sigma_0$ , интегральная функция распреде-

редная прочность  $<\sigma_B>$  материала, то соотношение (12) позволяет определить пороговое значение прочности  $\sigma_0$  в распределении Вейбулла (11). Решение уравнения (12) относительно начальной пористости  $p_0$  в соответствии с соотношениями (2) и (6) можно представить в виде

ние (12) получено из условия, что средняя деформация разрушения керамического материала без пор  $<\varepsilon_B>$  совпадает со средней деформацией разрушения скелета керамического материала с начальными порами  $<\varepsilon_B>$ , т.е. разрушение реализуется по живому сечению материала.

Разрушенные микрообъёмы, как было оговорено выше, моделируются однородными микроповреждениями квазисферической формы, поэтому (в развитие работы [6]) соотношения (10), (11) позволяют записать уравнение баланса пор в виде степенной зависимости

ления прочности керамического материала  $F(<<\sigma_1>>)$  равна нулю и  $p = p_0 = const$ , соответствующая начальной пористости материала. Она была оценена выше зависимостью (12). При  $F(<<\sigma_1>>)$ , равной единице, керамический материал считается

полностью разрушенным. Подстановка выражения (11) в соотношение (13) позволяет

$$p = p_0 + (1 - p_0)[1 - \exp\left\{-\left(V/V_0\right)[(\langle\sigma_1\rangle - \sigma_0)/\sigma_U]^\chi\right\}]^{1/\theta}.$$

При активном нагружении в соответствии с соотношениями (2) и (9), а также

$$\langle\langle\sigma_1\rangle\rangle = \langle\sigma_1\rangle/(1-p) = \mathcal{E}^*(p)\langle\varepsilon_1\rangle/(1-p), \quad (15)$$

после подстановки которого в уравнение баланса пор (14) можно получить расчетное соотношение

$$\langle\varepsilon_1\rangle - (1-p)\sigma_0/\mathcal{E}^*(p) = [(1-p)\sigma_u/\mathcal{E}^*(p)]\{(V/V_0)\ln[1-(p-p_0)/(1-p_0)]^\theta\}^{1/\chi}. \quad (16)$$

Здесь  $\mathcal{E}^*(p)$  – переменный упругий параметр, связывающий главное напряжение  $\sigma_1$  и главную деформацию  $\varepsilon_1$ . Уравнение (16) является основным уравнением для определения текущей пористости  $p$  керамического материала в зависимости от уровня главной деформации  $\langle\varepsilon_1\rangle$  на активном участке деформирования. Относительно текущей пористости  $p$  уравнение (16) является нелинейным, и решение его отыскивается методом последовательных приближений. После определения текущей

пористости  $p$  для достигнутого уровня главной деформации могут быть вычислены эффективные упругие характеристики ( $K^*(p)$ ,  $G^*(p)$ ,  $E^*(p)$ ,  $\nu^*(p)$ ) керамического материала с помощью соотношений (6). Тем самым устанавливаются две основные нелинейные кривые деформирования керамического материала: зависимость всестороннего давления  $\sigma$  от объёмной деформации  $\varepsilon$  и зависимость интенсивности напряжений  $s_i$  от интенсивности деформаций  $\dot{\varepsilon}_i$ .

реальным напряженно-деформированным состоянием можно записать выражение

$$\langle\langle\sigma_1\rangle\rangle = \langle\sigma_1\rangle/(1-p) = \mathcal{E}^*(p)\langle\varepsilon_1\rangle/(1-p), \quad (15)$$

### Приложение вероятностной модели деформирования и разрушения к контактной задаче для лопаток со случайно распределенными порами в хвостовике

Для оценки эффективности предложенных моделей деформирования и разрушения хрупкого керамического материала и отработки методики была решена контактная задача для лопатки ТВД малоразмерного ГТД (рис. 1) со случайным распределением пор. Материал лопатки и хвостовика - ОТМ-907 (ОНПП «Технология»):  $E=242$  ГПа,  $\nu=0,27$ ,  $\sigma_b=80$  ГПа,  $\chi=5,8$ . Объемное содержание пор  $p_0=1,5\%$ . При этом размер пор составил 0,15 мм.

Границные условия: жестко закрепляем хвостовик в осевом направлении и создаем контактную поверхность между хвостовиком и диском.

На первом этапе с помощью генератора случайных чисел создаем массив необходимого количества целых чисел.

Далее, используя команду «Input», удаляем все элементы хвостовика, которые соответствуют числам из сформированного массива, и получаем хвостовик со случайным распределением пор объемом 1,5% (размеры пор не более 0,15 мм).

Общее количество элементов в конечноэлементной модели лопатки и диска ТВД - 731249, узлов - 779428.

Затем опытным путем определяем угловую скорость, при которой главное напряжение находится в области предельных значений для материала хвостовика. Как показали расчеты, это 4440 рад/с. При таком обороте главное напряжение составляет 783 МПа.

Эта скорость и была взята за основу при дальнейшем расчете.

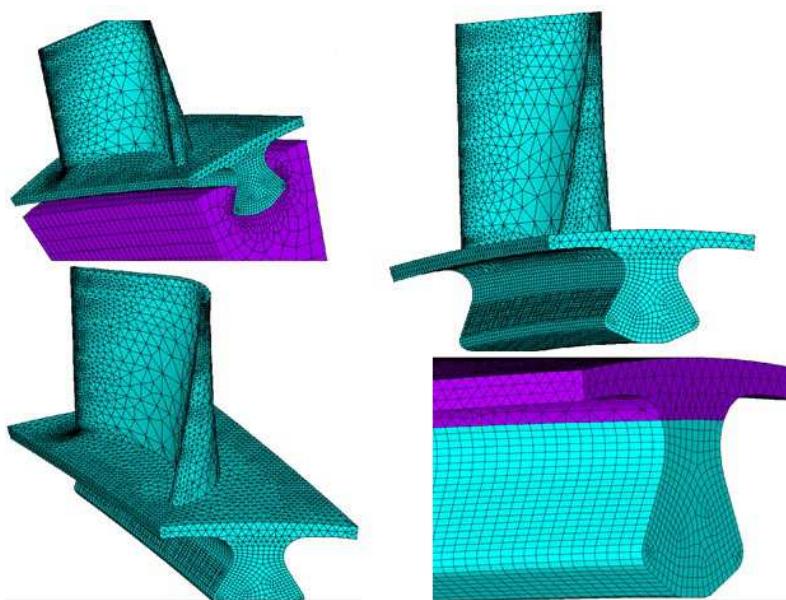


Рис. 1. Модель лопатки и диска ТВД

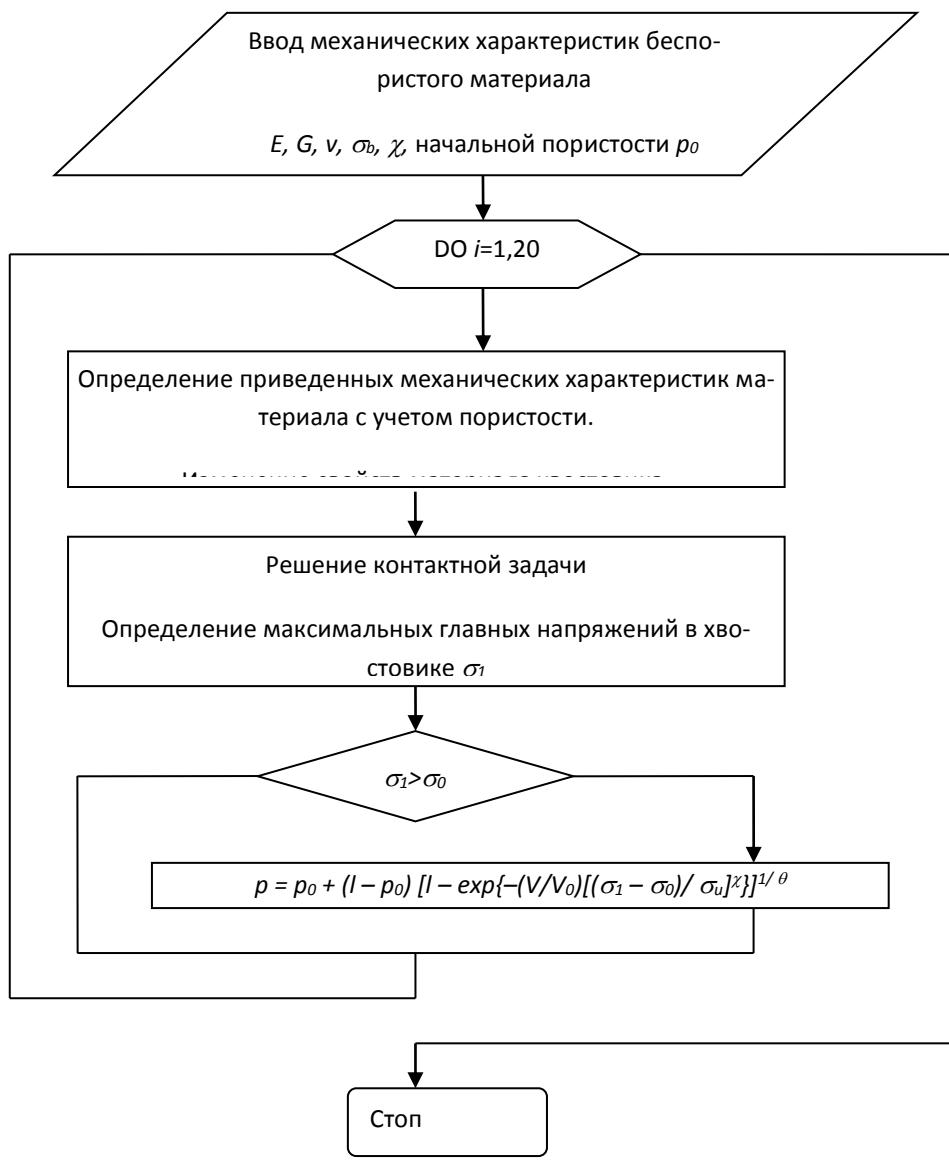


Рис. 2. Алгоритм расчета

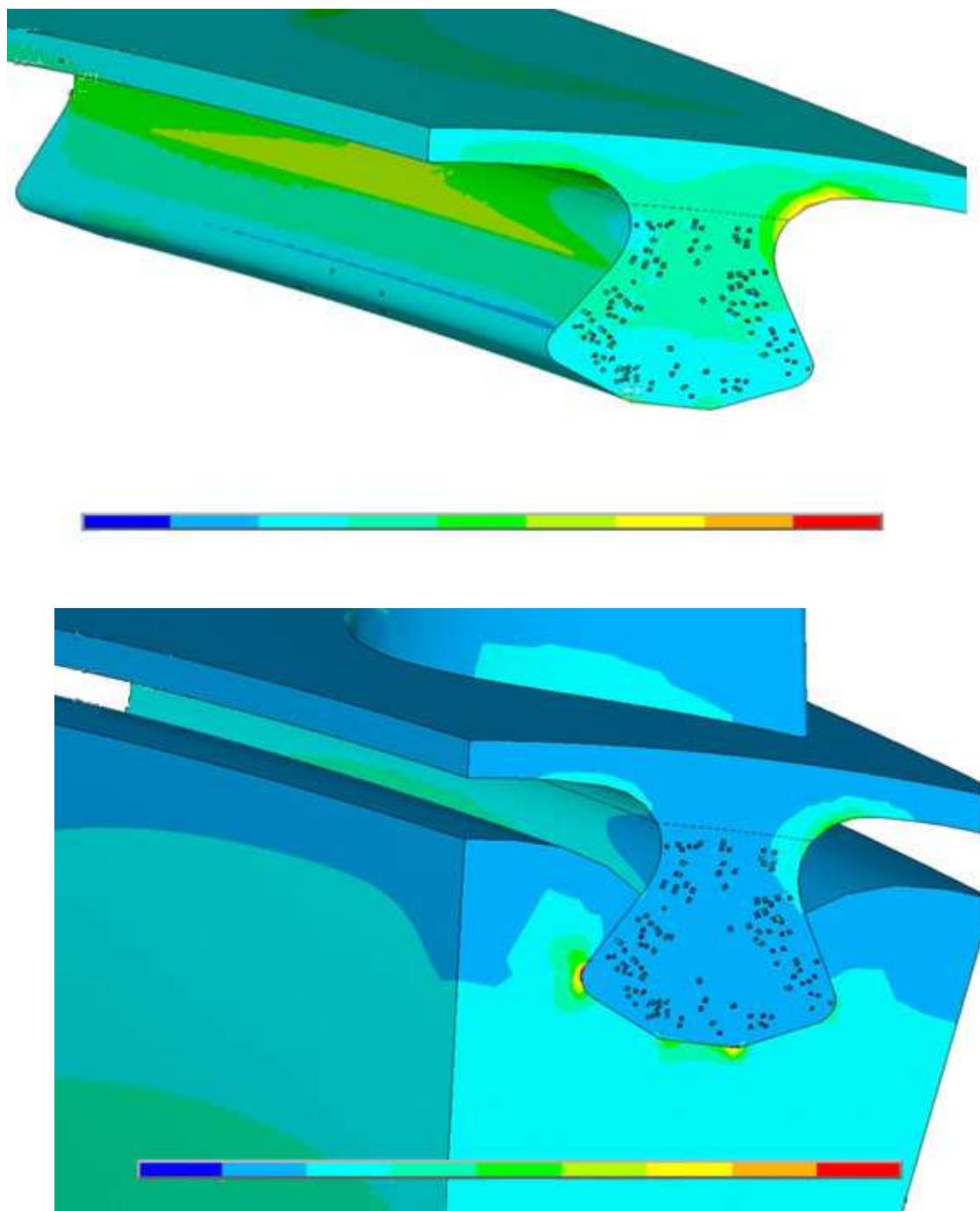


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние хвостовика и области контакта хвостовика с металлическим диском (угловая скорость 4640 рад/с)

Было проведено 20 циклов расчетов с изменением угловой скорости с шагом 10 рад/с. В каждом цикле учитывался результат предыдущего расчета и пересчитывалось объемное содержание пор. Соответственно изменялись механические характеристики материала хвостовика. Общее время расчета одного цикла составило 3 ч 20 мин, общее время расчета - 66 ч 40 мин.

Результаты расчета последнего цикла приведены на рис. 3.

Обобщенные результаты расчета приведены в таблице. Они согласуются с аналитическими кривыми, полученными с использованием разрабатываемой модели деформирования и разрушения хрупких керамических материалов (рис. 4 и 5).

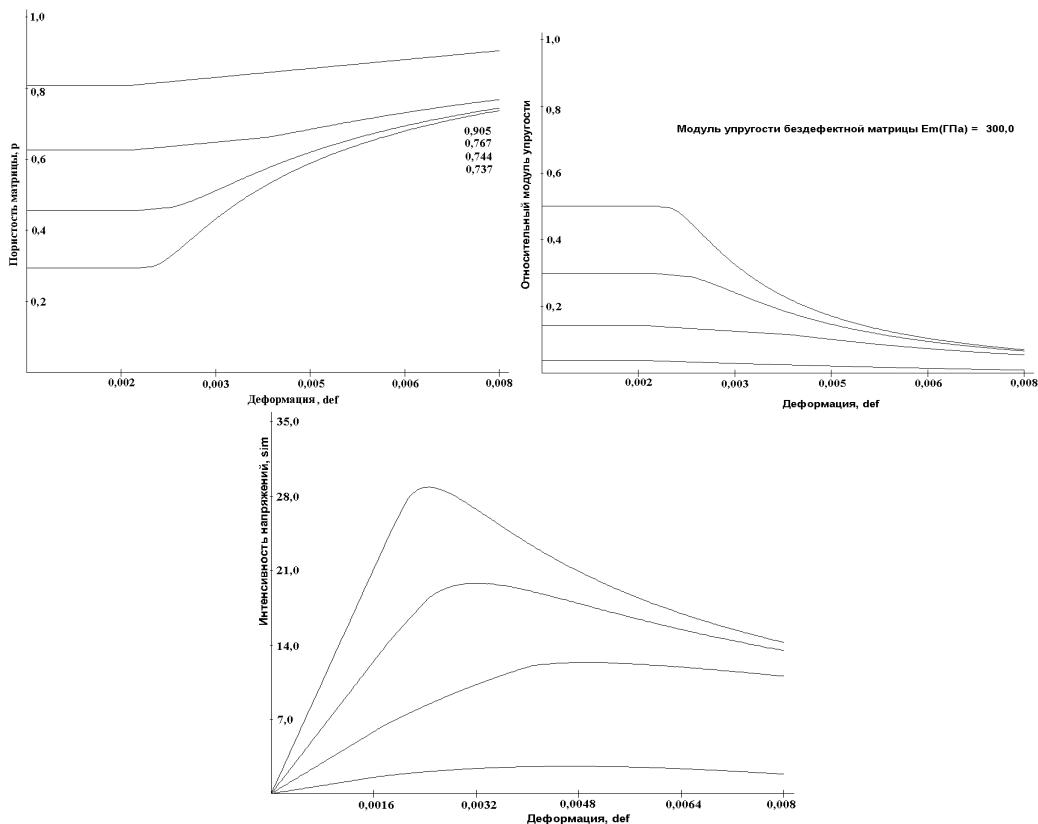


Рис. 4. Зависимости пористости  $p$ , модуля упругости и интенсивности напряжений материала матрицы от главной деформации  $\langle \varepsilon_l \rangle$  для различных значений порогового напряжения  $\sigma_0$

Таблица

Обобщенные результаты расчета

Угловая скорость, рад/с	Коэффициент Пуассона $\nu$	Модуль упругости $E$ , МПа	Объемное содержание пор	Главное напряжение $\sigma_l$ , МПа
4440	0,263478	23648,12	0,017309	78,38606
4450	0,263478	23249,87	0,022419	78,32771
4460	0,255432	22973,98	0,023256	78,07787
4470	0,255432	22928,97	0,026661	78,26534
4480	0,252698	22746,54	0,028345	78,16614
4490	0,251613	22656,61	0,034277	78,35397
4500	0,247804	22341,75	0,034282	77,67046
4510	0,247802	22341,52	0,034285	77,66332
4520	0,247799	22341,33	0,034698	78,00067
4530	0,247535	22319,51	0,038448	78,28179
4540	0,245134	22122,05	0,038448	77,30354
4550	0,245134	22122,05	0,038448	77,12524
4560	0,245134	22122,05	0,038448	77,28143
4570	0,245134	22122,05	0,038448	77,58923
4580	0,245134	22122,02	0,038456	77,70181
4590	0,245129	22121,6	0,041129	78,23193
4610	0,243421	21981,53	0,271818	79,24426
4620	0,10549	11872,67	0,271818	69,08154
4630	0,10549	11872,67	0,271818	68,73971
4640	0,10549	11872,67	0,271818	68,16739

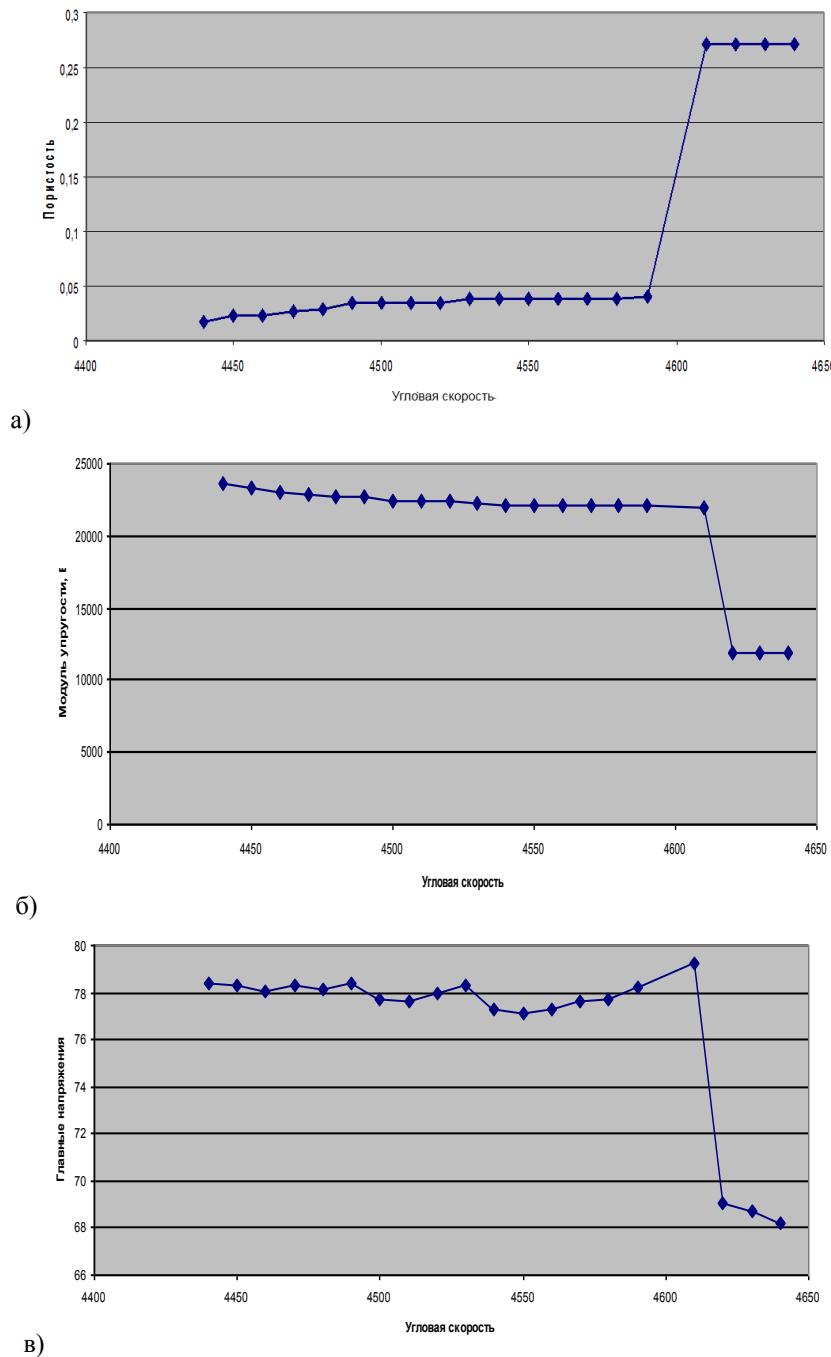


Рис. 5. Зависимости пористости  $p$  (а), модуля упругости (б) и главных напряжений (в) материала хвостовика лопатки ТВД от угловой скорости

### Заключение

Как видно из результатов расчета, с увеличением оборотов увеличивается объемное содержание пор, что приводит к уменьшению упругих характеристик материала и соответственно уменьшает главные напряжения в области контакта. При

угловой скорости 4610 рад/с происходит скачкообразное увеличение объемного содержания пор, что приводит к резкому снижению упругих характеристик и главных напряжений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механика композиционных материалов: сб. ст. / ред. Л. Браутман и Р. Крон. - М.: Мир, 1978. - Т. 2.
2. Кристенсен, Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. - М.: Мир, 1978. - 334 с.
3. Biot, M.A. Theory of Elasticity and Consolidation for Porous Anisotropic Solid / M.A. Biot // J. Applied Physics. - 1955. - № 26. - P. 182-185.
4. Хорошун, Л.П. Методы теории случайных функций в задачах о микроскопических свойствах микронеоднородных сред / Л.П. Хорошун // Прикладная механика. - 1987. - Т. 23. - № 10. - С. 100-108.
5. Composite Material Mechanics: proceedings / under the editorship of L. Brautman and R. Cron. - M.: World, 1978. - Vol.2.
2. Christensen, R. Introduction into Mechanics of Composites / R. Christensen. - M.: World, 1978. - pp. 334.
3. Biot, M.A. Theory of Elasticity and Consolidation for Porous Anisotropic Solid / M.A. Biot // J. Applied Physics. - 1955. - № 26. - P. 182-185.
4. Khoroshun, L.P. Methods of random function theory in problems on microscopic properties of micro-heterogeneous media / L.P. Khoroshun // Applied Mechanics. - 1987. - Vol.23. - No.10. - pp. 100-108.
5. Cherepanov, G.P. Mechanics of Composite Material Destruction / G.P. Cherepanov. - M.: Science,
5. Черепанов, Г.П. Механика разрушения композиционных материалов / Г.П. Черепанов. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. - 296 с.
6. Хорошун, Л.П. Основы микромеханики повреждаемости материала. Кратковременная повреждаемость / Л.П. Хорошун // Прикладная механика. - 1998. - Т. 34. - № 10. - С. 120-127.
7. Каримбаев, Т.Д. Разработка моделей деформирования композиционных материалов с хрупкой матрицей: отчет о НИР: 200-3647 / ЦИАМ; Каримбаев Т.Д., Николаев Д.И., Мыктыбеков Б.М., Половин М.М. - М., 2002. - 52 с.
8. Каримбаев, Т.Д. Математические модели нелинейного деформирования односторонне армированных композиционных материалов / Т.Д. Каримбаев, Б. Мыктыбеков, И.М. Панова // Труды ЦИАМ. - М., 2005. - № 1334. - 160 с.
- Head Editorial Board of Phys-Math. Lit., 1983. - pp. 296.
6. Khoroshun, L.P. Micro-mechanics fundamentals of material damaging. Short-term damaging / L.P. Khoroshun // Applied Mechanics. - 1998. - Vol.34. - No.10. - pp. 120-127.
7. Karimbaev, T.D. Model development of deformation of composite materials with brittle matrix: Research Report: 200-3647 / CIAEM; Karimbaev T.D., Nikolaev D.I., Myktybekov B.M., Polovin M.M. - M.: 2002. - pp. 52.
8. Karimbaev, T.D. Mechanical models of non-linear deformation of unidirectional reinforced composite materials / T.D. Karimbaev, B. Myktybekov, I.M. Panova // Proceedings of CIAEM. - M., 2005. - No.1334. - pp. 160.

*Статья поступила в редакцию 26.12.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор*

*Дмитрак Ю.В.*

## Сведения об авторах:

**Силуянова Марина Владимировна**, д.т.н., профессор Московского авиационного института, e-mail: [dc2mati@yandex.ru](mailto:dc2mati@yandex.ru). тел.8-916-612-83-54.115432.

**Сильченко Ольга Борисовна**, д.т.н., профессор Московского авиационного института, e-mail: [silyaolya@yandex.ru](mailto:silyaolya@yandex.ru). тел.8-926-181-07-88.125413.

**Низовцев Владимир Евгеньевич**, к.т.н., нач. отдела № 057 Центрального института авиационного

моторостроения им. П.И. Баранова, e-mail: [3991258@mail.ru](mailto:3991258@mail.ru). тел. 8-925-370-51-25.121357.

**Мыктыбеков Бахытжан**, ведущий технолог отдела № 057 Центрального института авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, e-mail: [bahit@ciam.ru](mailto:bahit@ciam.ru).

**Корнилов Александр Ананьевич**, ведущий инженер отдела № 057 Центрального института авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, e-mail: [kornilov@ciam.ru](mailto:kornilov@ciam.ru). тел.8-925-379-46-50.107370.

**Kornilov Alexander Ananievich**, Principal engineer of Dep. 057, Baranov Central Institute of Aircraft Engine Manufacturing, e-mail: [kornilov@ciam.ru](mailto:kornilov@ciam.ru).

**Myktybekov Bakhytzhan**, Principal technologist of Dep. 057, Baranov Central Institute of Aircraft Engine Manufacturing, e-mail: [bahit@ciam.ru](mailto:bahit@ciam.ru).

**Nizovtsev Vladimir Evgenievich**, Can. Eng., Chief of Dep. 057, Baranov Central Institute of Aircraft Engine Manufacturing, e-mail: [3991258@mail.ru](mailto:3991258@mail.ru).

**Silchenko Olga Borisovna**, D. Eng., Prof. of Moscow Aircraft Institute, e-mail: [silyaolya@yandex.ru](mailto:silyaolya@yandex.ru).

**Siluyanova Marina Vladimirovna**, D. Eng., Prof. of Moscow Aircraft Institute, e-mail: [dc2mati@yandex.ru](mailto:dc2mati@yandex.ru).

## Транспорт

УДК 621.838  
 DOI: 10.12737/article\_5a795ffba10673.88003311

Е.В. Сливинский, С.Ю. Радин

### ИСКЛЮЧЕНИЕ САМОДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ В СЛУЧАЕ ИСТОЩЕНИЯ ТОРМОЗА

Представлены материалы, касающиеся разработки перспективной конструкции, предназначеннной для исключения самодвижения грузовых вагонов в случае истощения тормоза. Разработка рекомендована научно-исследовательским и промышленным структурам в области тяжёлого маши-

ностроения как в нашей стране, так и за рубежом с целью ее дальнейшего изучения и возможного внедрения в практику.

**Ключевые слова:** грузовой вагон, самодвижение, истощение тормоза, рычаг подвески, триангуль, воздухораспределитель, запасный резервуар.

E.V. Slivinsky, S.Yu. Radin

### EXCLUSION OF FRIGHT CAR SPONTANEOUS MOTION IN CASE OF BRAKE DEPLETION

In the design of modern freight cars the automatic indirectly acting brake devices are widespread to change motion modes and freight cars location in parking. A substantial drawback of such a brake system is that in case of air leak from the control reservoir at a prolonged park of a single freight car or a group of cars without a locomotive and, hence, at pressure absence of compressed air in a brake conduit a brake dismissal may occur which may result in the spontaneous car

motion. In Bunin State University of Yelets there is developed at the level of an invention a promising design of an indirect-acting brake which excludes this drawback and a number of computations is carried out for its efficient design parameter substantiation.

**Key words:** freight car, spontaneous motion, brake depletion, suspension arm, break beam, air distributor, control reservoir.

#### Введение

В практике на железнодорожном подвижном составе широко используются автоматические непрямодействующие

тормозные устройства колодочной и дисковой конструкции (рис. 1).



Рис. 1. Тормозные устройства

Обычно колодочное тормозное устройство железнодорожных вагонов состоит из рычажной передачи, которая включает в себя шарнирно соединённые между собой рычаги и подвески с триан-

гелями и тормозными колодками, управляемыми тормозным цилиндром, подключенным к запасному резервуару через воздухораспределитель, питаемый сжатым воздухом из подключённой к локомотиву

тормозной магистрали вагона. Существенным недостатком такого тормоза является то, что в случае утечки воздуха из запасного резервуара при длительной стоянке одиночного вагона или группы вагонов без локомотива и, следовательно, отсутствия давления сжатого воздуха в тормозной магистрали, может произойти роспуск тормозов, что приведёт к самодвижению вагонов. В практике, чтобы предупредить такое возможное явление, используют башмаки, которые укладывают вручную на рельсы под колёса вагонов.

### Описание перспективной конструкции непрямодействующего тормоза для грузовых вагонов

На протяжении ряда лет кафедрой МиТП ЕГУ им. И.А. Бунина совместно с Елецким участком Белгородского отделения ЮВЖД (филиала ОАО «РЖД») на договорных началах проводилась НИР, направленная на повышение эффективности использования и безопасности движения подвижного состава. Одним из разделов этой НИР является тема, связанная с разработкой технических средств, исключающих возможность самодвижения локомотивов и вагонов, причём таких, работа которых осуществляется в автоматическом режиме по мере истощения тормоза.

Анализ значительного числа отечественных и зарубежных библиографических и патентных источников позволил разработать на уровне изобретения (RU2551860) перспективную конструкцию тормоза, позволяющую в случае его истощения исключить возможность самодвижения грузовых вагонов.

Тормоз грузового вагона (рис. 2) состоит из тормозной магистрали 1, связанной трубопроводом 2 с воздухораспределителем 3, который с одной стороны при помощи трубопровода 4 соединен с тормозным цилиндром 5, а с другой - трубопроводом 6 с запасным резервуаром 7. Запасный резервуар 7 при помощи трубопровода 8 связан с пустотелым стержнем 9, который одним своим концом жестко присоединен к тормозному цилинду 5, а другим прикреплен к винтовой пружине растяжения 10, закрепленной на плунжере 11, подвижно установленном в полости 12

Несмотря на эффективность такого рода фиксации подвижного состава, у нее есть недостатки. Во-первых, операция установки башмаков вручную небезопасна, и, во-вторых, известны случаи, когда станционные работники забывают установить башмаки и, следовательно, самодвижение вагонов не исключено. В то же время известны случаи, когда те же работники забывают убрать башмаки, и тогда при начальном движении подвижной состав сходит с рельсов.

штока 13 поршня 14. В полости 12 выпол-

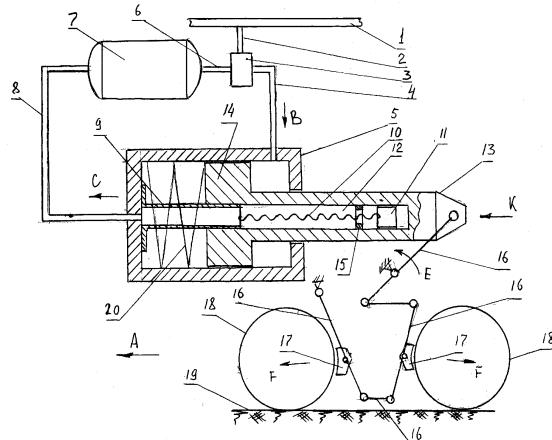


Рис. 2. Принципиальная схема тормоза грузового вагона

шен упор 15. Шток 13 через рычажную передачу 16 связан с тормозными колодками 17, взаимодействующими с колесами 18 колесных пар, перемещающихся по рельсовому пути 19. Поршень 14 подпружинен возвратной пружиной сжатия 20 относительно стенки тормозного цилиндра 5.

Работает тормоз грузового вагона следующим образом. При поступательном движении грузового вагона, например по стрелке А, все детали его тормозного устройства находятся в положении, показанном на рис. 2. При этом тормозная магистраль 1 и запасный резервуар 7 заряжены сжатым воздухом с давлением порядка 0,6 МПа. В то же время сжатый воздух из запасного резервуара 7 поступает в трубопровод 8 и пустотелый стержень 9, а также в полость 12 штока 13 поршня 14. Под действием такого давления сжатого возду-

ха плунжер 11 находится в положении, показанном на рис. 2, упруго деформируя при этом винтовую пружину растяжения 10.

В случае необходимости снижения скорости грузового вагона или его останова машинист локомотива широко известным в данной области техники способом снижает давление сжатого воздуха в тормозной магистрали 1, что позволяет воздухораспределителю 3 перекрыть трубопровод 6 и в открывшийся в нем трубопровод 4 подать сжатый воздух по стрелке В в тормозной цилиндр 5. Это в итоге обеспечивает движение по стрелке С поршня 14, который, во-первых, сжимает возвратную пружину сжатия 20 и, во-вторых, обеспечивает угловой поворот рычажной системы 16 по стрелке Е и поджим тормозных колодок 17 к колесам 18 по стрелкам F. После того как снова возникла необходимость поступательного движения вагона, машинист (также широко известным в данной области техники способом) поднимает давление сжатого воздуха до нормативного значения, что позволяет воздухораспределителю 3 соединить трубопровод 4 с атмосферой, а через открывшийся трубопровод 6 подать сжатый воздух в запасный резервуар 7, обеспечив его зарядку. Это позволит поршню 14 и его штоку 13 под действием ранее сжатой возвратной пружины 20 переместиться в направлении, обратном стрелке С, что обеспечит перемещение тормозных колодок 17 в направлении, обратном стрелке F, и тогда колеса 18 колесных пар окажутся незаторможенными.

Предположим теперь, что грузовой вагон отцеплен от локомотива и находится в заторможенном состоянии, как это было описано выше для служебного его торможения. В этом случае за счет возможной утечки воздуха из тормозного цилиндра 5, а следовательно, и запасного резервуара 7 произойдет снижение давления в полости 12 штока 13 поршня 14, что позволит ему переместиться по стрелке К к плунжеру 11, который войдет в контакт с упором 15. Такое взаимодействие плунжера 11 и упора 15 будет способствовать удерживанию штока 13 и поршня 14 под действием рас-

тянутой винтовой пружины растяжения 10 в крайнем левом положении, что при сжатом состоянии возвратной пружины сжатия 20 обеспечит поджим тормозных колодок 17 к колесам 18 колесных пар. Иными словами, самодвижение грузового вагона будет исключено. При необходимости использования грузового вагона в движении к нему прицепляют локомотив, машинист которого известным способом производит зарядку тормозной магистрали 1, что позволяет воздухораспределителю 3 соединить тормозной цилиндр 5 с атмосферой через трубопровод 4. Его поршень 14 под действием ранее сжатой возвратной пружины сжатия 20 возвратится совместно со штоком 13 в крайнее правое положение, противоположное стрелке К, а плунжер 11 под действием сжатого воздуха, поступающего от запасного резервуара 7 по трубопроводу 8, займет положение, показанное на рис. 2, растянув при этом винтовую пружину растяжения 10. Последнее действие позволяет тормозным колодкам 17 отойти от колес 18 колесных пар, получив тем самым возможность вращения. Далее описанные процессы могут повторяться неоднократно.

Технико-экономическое преимущество предложенного технического решения в сравнении с известными очевидно, так как оно позволяет в случае истощения тормоза надежно удерживать рельсовые транспортные средства в заторможенном состоянии.

Проанализируем описание предложенного технического решения (рис. 2). Видно, что основным узлом конструкции является шток 13 с расположенным в нём плунжером 11, снабжённым упором 15 и винтовой пружиной растяжения 10, которые, по сути дела, образуют бесштоковый пневмоцилиндр одностороннего действия. Причём торцевыми крышками его являются как шток 13, так и торцевая поверхность пустотелого стержня 9 с примыкающим к нему упором 15 (рис. 2). Поэтому расчёт основных параметров такого пневмоцилиндра выполним в следующей последовательности.

Конструктивная особенность тормозных устройств на подвижном составе, как

это было отмечено выше, заключается в том, что для того чтобы привести тормоз в действие, необходимо понизить давление в тормозной магистрали на определенную величину. Ясно, что режимы падения давления и темп его понижения при медленном, служебном и экстренном торможении значительно отличаются от стояночного режима, когда такое понижение связано с самопроизвольными утечками сжатого воздуха из тормозных цилиндров. Выполним расчет и анализ данных параметров для этого режима применительно к четырехосному полуавтомату грузоподъемностью 60 т, у которого нагрузка на ось составляет 20 т. Известно [1], что тележка такого вагона (их на вагоне две) имеет две колесные пары, к колесам которых примыкают тор-

$$F_{mp} = \frac{K}{2} f_{ck} = 4,5 \cdot 0,18 = 0,81 \text{ т},$$

где  $f_{ck}$  - коэффициент трения скольжения чугуна по стали, равный 0,18 [2].

Будем считать, что шток 13 (рис. 2) имеет наружный диаметр  $d_{ш} = 80$  мм, а внутренний -  $d_b = 60$  мм, следовательно, диаметр  $d_{пл}$  плунжера 11 также будет равен 60 мм. В то же самое время плунжер 11 будет находиться в крайнем правом положении, растянув пружину растяжения, так как чтобы разместить указанные детали в тормозном цилиндре 5 и сохранить такой же размер поршня со стороны его подпоршневой части, как у серийного поршня, а рабочую площадь  $S = 730 \text{ см}^2$ , необходимо чтобы внутренний диаметр тормозного цилиндра стал равным  $d_{п} = 384$  мм. В этом случае его шток диаметром  $d_{ш} = 80$  мм при давлении сжатого воздуха  $p = 0,35 \text{ МПа}$  разовьет усилие  $P_y = pS = 3,5 \cdot 730 = 2,5 \text{ т}$ . Тогда, зная силу нажатия на все четыре оси колесных пар тележек полуавтомата  $\sum K = 9 \cdot 4 = 36 \text{ т}$ , можно определить передаточное число рычажной передачи тормоза:  $U = \frac{\sum K}{P_y} = \frac{36}{2,5} = 14,4$ .

Предположим, что давление сжатого воздуха за счет различных утечек упало до  $0,15 \text{ МПа}$ , тогда  $P_y = 1,5 \cdot 730 = 1,1 \text{ т}$  и  $\sum K = P_y \cdot U = 1,1 \cdot 14,4 = 15,8 \text{ т}$ . Следовательно, в этом случае сила нажатия на одно колесо  $K = 15,8 / 8 = 1,9 \text{ т}$ , а сила трения

мозные колодки, поджимаемые к ним с силой нажатия  $K$  и создающие тем самым силы торможения  $F_{mp}$  при расположении вагона как на уклонах (под определенным углом  $\gamma$  по отношению к горизонту), так и на прямолинейных участках железнодорожного пути.

Предположим, что полуавтомат находится в отцепленном от локомотива состоянии на площадке станционного пути. При этом давление сжатого воздуха в тормозном цилиндре  $p = 0,35 \text{ МПа}$ . Примем, что коэффициент нажатия тормозных колодок  $\delta = 0,45$ . Тогда сила нажатия на одну ось  $K = P \cdot \delta = 20 \cdot 0,45 = 9 \text{ т}$ , а на одно колесо - 4,5 т. Следовательно, сила трения  $F_{mp}$  между каждым колесом и его тормозной колодкой будет равна:

$F_{mp} = K \cdot f_{ck} = 1,9 \cdot 0,18 = 0,35 \text{ т}$ . При этом плунжер 11 будет находиться еще в крайнем правом положении, растянув винтовую пружину растяжения 10 (рис. 2).

Если полуавтомат расположен на уклоне %, как это описано выше, то понятно, что самодвижение его при давлении сжатого воздуха 0,35 МПа будет исключено. Теперь предположим, что для давления  $p = 0,35 \text{ МПа}$  уклон составил 10 %. Однако и на этом уклоне полуавтомат получить самодвижение не может, так как  $P_y = pS = 3,5 \cdot 730 = 2,5 \text{ т}$ .

Произведем подобные вычисления при давлении сжатого воздуха 0,15 МПа и уклоне 10 %. В этом случае, как показали ранее проведенные расчёты [4], момент на колесе, вызывающий начало возможного движения,  $T_l = 0,16 \text{ т} \cdot \text{м}$ . При имеющемся моменте трения, создаваемого им,  $T_{mp} = 0,35 \cdot 0,45 = 0,16 \text{ т} \cdot \text{м}$  уже возникает опасность, что тормоз не сможет удержать вагон от самодвижения. Отсюда видно, что если  $T_l = T_{mp}$ , то и незначительное последующее снижение давления может привести к самодвижению вагона. Поэтому понятно, что винтовая пружина растяжения 10 (рис. 2) должна развивать такое усилие, чтобы при данном давлении сжатого воздуха в полости, связанной с запасным резервуаром (в котором упало давление, как

и в тормозном цилиндре), переместить плунжер 11 влево и тем самым упором 15 удержать шток 13 в положении, когда тормозные колодки 17 плотно прижаты к колёсам колёсных пар. Следовательно, винтовая пружина растяжения 10 должна создать усилие порядка 1,32 т (коэффициент

запаса примем равным 1,2). Выбираем из справочника [3] пружину со следующими характеристиками:  $D_{\text{нар}} = 60$  мм;  $D_{\text{ср}} = 138$  мм; диаметр прутка - 18 мм, шаг  $t = 40$  мм, длина  $L = 200$  мм, материал - сталь 60С2 (по ГОСТ 2590-51). Рабочее усилие такой пружины составляет 1,4 т.

### Заключение

В заключение следует отметить, что различные типы подвижного состава могут быть снабжены описанным устройством с учетом его массовых и конструкционных характеристик. Используя представленную методику расчета, можно рассчитать рациональные геометрические и кинематические параметры предложенного устройства, исключающего возможность самодвижения вагонов.

Результаты исследования переданы руководству Елецкого участка Белгородского региона ЮВЖД (филиала ОАО «РЖД») в виде экспресс-отчёта по выполненной части вышеуказанной НИР, а также рекомендуются к использованию соответствующим НИИ, специализированным КБ и промышленным предприятиям, проектирующим и изготавливающим грузовой подвижной состав, как в нашей стране, так и за рубежом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагоны. Конструкция, теория и расчет / под ред. Л.А. Шадура. - М.: Транспорт, 1980. - 439 с.
2. Крылов, В.И. Тормоза локомотивов / В.И. Крылов. - М.: Трансжелдориздат, 1963. - 461 с.
3. Заплетохин, В.А. Конструирование деталей механических устройств: справочник / В.А. Заплетеихин. - Л.: Машиностроение, 1990. - 669 с.
4. Сливинский, Е.В. Модернизация пневматического тормоза пассажирских вагонов электропоездов / Е.В. Сливинский, В.И. Киселёв, В.В. Теслин // Системы управления, технические системы: пути и методы исследования: материалы межвуз. науч.-практ. конф. - Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2012. - Вып. 4. - 204 с.
  
1. *Cars. Design, Theory and Computation* / under the editorship of L.A. Shadura. – Transport, 1980. – pp. 439.
2. Krylov, V.I. *Locomotive Brake Systems* / V.I. Krylov. – M.: Traszheldorizdat, 1963. – pp. 461.
3. Zapletokhin, V.A. *Design of Mechanism Parts: reference book* / V.A. Zapletokhin. – L.: Mechanical Engineering, 1990. – pp. 669.
4. Slivinsky, E.V. Airbrake updating of electric train coach cars / E.V. Slivinsky, V.I. Kiselyov, V.V. Teslin // *Systems of Control, Engineering Systems: Ways and Methods of Investigations: Proceedings of the Inter-College Scientif.-Pract. Conf.* – Yelets: Bunin State University of Yelets, 2012. – Ed. 4. – pp. 204.

*Статья поступила в редакцию 23.11.2016.  
Рецензент: к.т.н., доцент ЕГУ им. И.А. Бунина  
Елецких С.В.*

### Сведения об авторах:

**Сливинский Евгений Васильевич**, д.т.н., профессор кафедры механики и технологических процессов Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина, e-mail: [evgeni\\_sl@mail.ru](mailto:evgeni_sl@mail.ru).

**Slivinsky Yevgeny Vasilievich**, D. Eng., Prof. of the Dep. of Mechanics and Engineering Procedure, Bunin State University of Yelets, e-mail: [evgeni\\_sl@mail.ru](mailto:evgeni_sl@mail.ru).

**Радин Сергей Юрьевич**, к.т.н., доцент кафедры механики и технологических процессов Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина, тел.: 8 910 251 36 55.

**Radin Sergey Yurievich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. of Mechanics and Engineering Procedure, Bunin State University of Yelets, Phone: 8 910 251 36 55.

УДК 629.45

DOI: 10.12737/article\_5a795ffc088ca3.77605824

А.Л. Забелин, В.В. Кобищанов, А.В. Вдовин

## ПЕРСПЕКТИВЫ И ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВУХОСНЫХ ВАГОНОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ РФ

Проведено обоснование применения двухосных вагонов на малозагруженных линиях пригородного сообщения, сопровождения при контейнерных и рефрижераторных перевозках. Рассмотрены необходимость и особенности применения

одноосных тележек на железнодорожном транспорте РФ.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, двухосные вагоны, ходовая часть, вагоны сопровождения.

A.L. Zabelin, V.V. Kobishchanov, A.V. Vdovin

### PROSPECTS AND PECULIARITIES OF USING TWO-AXLE CARS ON RAILWAY TRANSPORT IN THE RUSSIAN FEDERATION

The substantiation of two-axle car use on low-loaded suburban railways, tracking at container and refrigerator traffic is carried out. The necessity and peculiarities of single-axle bogies for use on railway

transport of the Russian Federation are considered.

**Key words:** railway transport, two-axle cars, running gear, tracking car.

Опыт использования железнодорожного транспорта для перевозки пассажиров [1] показывает, что на малозагруженных линиях целесообразно использование двухосных вагонов. Страны Азиатского региона нуждаются в двухосных пассажирских вагонах, о чем свидетельствуют переговоры представителей Иранских железных дорог с руководством Тверского института вагоностроения (ТИВ) и Тверского вагоностроительного завода (ТВЗ). В 2001 году кафедрой «Вагоны» БГТУ получено письмо ТИВ, в котором предлагается принять участие в разработке ходовой части для двухосного вагона.

Можно выделить следующие типы вагонов, которые целесообразно применять в двухосном исполнении:

а) пассажирские вагоны для пригородного сообщения в условиях малой загруженности линий, вагоны для перевозки персонала на промышленные объекты;

б) вагоны сопровождения.

Также тележки двухосных вагонов перспективно использовать для формирования ходовых частей пассажирских вагонов на сочлененных тележках.

Известно, что загруженность пригородного транспорта существенно зависит от времени суток. Максимальная загрузка

приходится на часы пик, то есть время, когда основная масса пассажиров движется на работу или с работы. В остальное время суток вагоны пригородных поездов, как правило, заполнены не полностью. Это приводит к увеличению затрат на перевозку пассажиров. На малозагруженных линиях, например линиях, соединяющих населенные пункты, не имеющие промышленных предприятий, пассажироперевозки с помощью четырехосных вагонов экономически невыгодны, так как полностью осевая нагрузка вагона не используется никогда. Следовательно, пассажироперевозки железнодорожным транспортом на подобных линиях с помощью четырехосных вагонов убыточны. Экономически целесообразно для таких линий иметь железнодорожные вагоны малой тары с малым количеством посадочных мест. В качестве транспортных средств на подобных линиях экономически выгодно применять двухосные вагоны, которые имеют, например, следующие параметры: масса тары – 25 ... 30 т, длина по раме - 12 ... 13 м.

Применение таких вагонов позволит максимально использовать осевую нагрузку и, как следствие, существенно снизить затраты на перевозку одного пассажира.

Пример подобного вагона приведен на рисунке.

*Вагоны сопровождения* служат для переезда бригад сопровождения, обеспечивающих сохранность груза при перевозках в поездах [2]. Бригада сопровождения, как правило, состоит из экспедиторов отправителя, получателя или представителей службы безопасности участка транспортного коридора и включает не более десяти человек. Для перевозки такого количества людей экономически крайне невыгодно использовать четырехосный пассажирский вагон – по соображениям существенного

недоиспользования несущей способности колесных пар и, как следствие, существенного увеличения затрат на перевозку одного пассажира. Следовательно, экономически целесообразно в качестве вагонов сопровождения применять двухосные пассажирские вагоны. Другой пример вагона сопровождения – вагон сопровождения для рефрижераторной секции [3]. В практике Брянского машиностроительного завода была постройка пятивагонной рефрижераторной секции, включающей в себя:

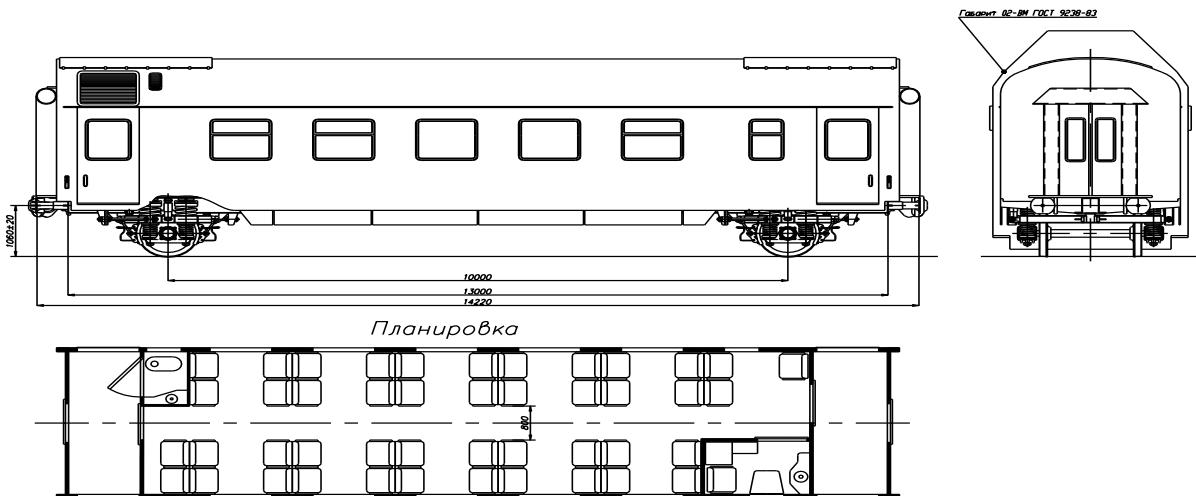


Рис. Вагон пассажирский двухосный для малозагруженных линий (вариант)

- четыре грузовых вагона, оборудованных холодильными установками;

- один вагон сопровождения, оборудованный дизель-генераторными установками и приборами контроля за состоянием груза и имеющий помещение для бригады сопровождения.

Практика показала, что пятивагонные рефрижераторные секции экономически невыгодны с точки зрения тарифов на перевозку грузов. Также совмещение в одном вагоне бытовых помещений и дизель-генераторных агрегатов существенно снижает уровень комфорта для бригады сопровождения.

Вариантом решения данной проблемы было создание АОРВ (автономного

рефрижераторного вагона). Вагон включал в себя:

- грузовое помещение;
- холодильные установки (одна или две, в зависимости от типа вагона);
- дизель-генераторный отсек;
- помещение для бригады сопровождения.

Недостатком данного варианта является существенное уменьшение объема грузового помещения вагона. Также, в связи с объединением вышеперечисленных помещений в одном кузове, бытовые помещения АОРВ весьма малы, что в совокупности с соседством бытовых помещений с довольно шумными агрегатами (дизель-генераторы и холодильные установки) существенно снижает уровень комфорта для бригады

сопровождения.

Вариантом решения проблемы было бы применение следующей схемы:

- АРВ (автономный рефрижераторный вагон) любой существующей конструкции, имеющий грузовое помещение, холодильные установки и силовую дизель-генераторную установку;

- вагон сопровождения, имеющий бытовые помещения и аппаратное помещение с приборами контроля за состоянием перевозимого груза.

В связи с малой загрузкой вагона сопровождения данный вагон, по причинам, описанным выше, целесообразно иметь в двухосном исполнении.

Существует практика перевозки персонала к промышленным и иным объектам по специализированным веткам с помощью железнодорожного транспорта. Особенностью данных перевозок является следующее:

- вагон в обоих направлениях движется в загруженном состоянии;

- число пассажиров определенное и мало изменяется.

В этом случае также экономически целесообразно применять двухосные вагоны – с точки зрения простоты обеспечения необходимого числа мест для пассажиров при полном использовании несущей способности осей колесных пар.

Используемые в настоящее время конструктивные схемы двухосных тележек имеют некоторые недостатки. Серийные двухосные тележки имеют раму, объединяющую колесные пары в единую конструкцию. Рама тележки подвергается действию больших вертикальных нагрузок. Так как основным видом деформации рамы является изгиб в вертикальной плоскости, то необходимость удовлетворения условий прочности приводит к значительному увеличению металлоемкости рамы и, следовательно, ее массы. Увеличение базы тележки, снижающее частоту колебаний виляния, значительно повышает массу рамы тележки и, как следствие, массу тары вагона, что экономически

нецелесообразно.

Кроме того, существующие серийные конструкции двухосных тележек не позволяют произвести радиальную установку колесных пар в кривых, уменьшающую износ гребней колес и рельсов и улучшающую качество хода вагона. Применение для этой цели специальных промежуточных устройств, обеспечивающих поворот колесной пары относительно рамы в горизонтальной плоскости, ведет к увеличению массы тележки и снижению экономичности перевозок.

Существует также способ применения одноосных тележек для формирования двухосных тележек посредством сцепа двух одноосных [4]. Основные достоинства формирования двухосной тележки из сцепа двух одноосных в сопоставлении с традиционной схемой двухосной тележки заключаются в следующем:

- в связи с тем что сцеп не имеет единой рамы, работающей на изгиб в вертикальной плоскости, масса ходовой части вагона существенно снижается, что влечет за собой уменьшение тары вагона;

- появляется возможность реализации радиальной установки колесных пар в кривых без добавления тяжелых, металлоемких элементов;

- повышается уровень унификации ходовых частей и их элементов, что упрощает ремонт тележек и повышает экономичность их использования.

На основании изложенного можно сделать вывод, что применение двухосных вагонов и одноосных тележек на подвижном составе железных дорог Российской Федерации является актуальным, перспективным и экономически выгодным.

Кафедрой «Подвижной состав железных дорог» («Вагоны») БГТУ разработано несколько вариантов двухосных короткобазных вагонов с малой тарой и несколько вариантов одноосных тележек. На конструкцию тележек были получены патент РФ на полезную модель [5] и патент РФ на изобретение [6]. На конструкцию составной двухосной тележки, представляющую собой сцеп двух одноосных тележек, получен патент РФ на изобретение [7].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- |  |  |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Смехов, А.А. Основы транспортной логистики / А.А. Смехов. - М.: Транспорт, 1995. - 197 с.</li> <li>2. Смехов, А.А. Основы транспортной логистики / А.А. Смехов. - М.: Транспорт, 1995. - 197 с.</li> <li>3. Николашин, В.М. Логистические принципы контейнерных перевозок и оптимизации цепей поставок товаров / В.М. Николашин // Транспорт. Наука, техника, управление. - М.: ВИНИТИ РАН, 2009. - №1. - С.28-30.</li> <li>4. Вагоны / Л.А. Шадур [и др.]. - М.: Транспорт, 1980. - 439 с.</li> <li>5. Мурzin, Р.В. Вертикальные колебания моторного вагона электропоезда на четырёх одноосных тележках и выбор параметров его рессорного подвешивания: дис. ... канд. техн. наук / Р.В. Мурзин. - М., 2003.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>6. RU 51373 U1. Одноосная тележка подвижной единицы железнодорожного транспорта: пат. на полез. модель. - № 51373; опубл. 10.02.06, Бюл. № 4.</li> <li>7. RU 2347701 C1. Одноосная тележка подвижной единицы железнодорожного транспорта: пат. на изобрет. - № 2347701; опубл. 27.02.09, Бюл. № 6.</li> <li>8. RU 2329907 C1. Двухосная тележка подвижной единицы железнодорожного транспорта: пат. на изобрет. - № 2329907; опубл. 27.07.08, Бюл. № 21.</li> </ol> |
|--|--|
- 
- |   |  |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Smekhov, A.A. <i>Transport Logistics Fundamentals</i> / A.A. Smekhov. – M.: Transport, 1995. – pp. 197.</li> <li>2. Nikolashin, V.M. Logistic principles of container traffic and chain optimization for delivery of goods / V.M. Nikolashin // <i>Transport. Science, Engineering, Management.</i> – M.: VINITI RAS, 2009. – No.1. – pp. 28-30.</li> <li>3. <i>Railway Cars</i> / L.A. Shadur [et al.]. – M.: Transport, 1980. – pp. 439.</li> <li>4. Murzin, R.V.</li> <li>5. Vertical oscillations of electric train powered car on four single-axle bogies and parameter choice of its spring suspension: <i>Thesis of Can. Eng. degree</i> / R.V. Murzin. – M.; 2003.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>6. RU 51373 U1. Single-axle bogie of railway traveling unit: <i>Pat. for Utility Model.</i> – No.51373; published. 10.02.06, Bull. No.4.</li> <li>7. RU 2347701 C1. Single-axle bogie of railway traveling unit: <i>Pat for Invention.</i> – No. 2347701; published 27.02.09, Bull. No.6.</li> <li>8. RU 2329907 C1. Two-axle bogie of railway traveling unit: <i>Pat. for Invention</i> – No. 2329907; published 27.07.08, Bull. No.21.</li> </ol> |
|---|--|

*Статья поступила в редколлегию 20.12.17.*

*Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета  
Антипин Д.Я.*

### Сведения об авторах:

**Забелин Алексей Леонидович**, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, e-mail: [swordphish\\_74@mail.ru](mailto:swordphish_74@mail.ru).

**Кобищанов Владимир Владимирович**, д.т.н., профессор кафедры «Подвижной состав железных

дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: [wagon@tu-bryansk.ru](mailto:wagon@tu-bryansk.ru).

**Вдовин Александр Викторович**, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, 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: [swordphish\\_74@mail.ru](mailto:swordphish_74@mail.ru).

**Kobishchanov Vladimir Vladimirovich**, D. Eng., Prof. of the Dep. “Railway Rolling-Stock”, Bryansk

State Technical University, e-mail: [wagon@tu-bryansk.ru](mailto:wagon@tu-bryansk.ru).

**Vdovin Alexander Victorovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering and Material Science”, Bryansk State Technical University, e-mail: [vdovin.alexander.v@yandex.ru](mailto:vdovin.alexander.v@yandex.ru).

## Международный открытый форум

УДК 159.9:331.015.11

DOI: 10.12737/article\_5a795ffc64d127.49426895

С.А. Богомолов, В.В. Спасенников

### ПРОБЛЕМЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ В ПРОЦЕССЕ СОЗДАНИЯ НОВЫХ СИСТЕМ, ИЗДЕЛИЙ И ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрены основные направления работы в сфере стандартизации эргономического обеспечения разработки и эксплуатации новых систем, изделий и технологий. Освещена история конверсионных разработок эргономического обеспечения создания образцов вооружения и военной техники. Показано, что разработка стандартов по эргономи-

ке как на международном, так и на национальном уровнях идет крайне медленно, что отрицательно сказывается на конкурентоспособности выпускаемой промышленной продукции.

**Ключевые слова:** стандартизация, эргономическое обеспечение, нормы и требования, система «человек – техника – среда».

S.A. Bogomolov, V.V. Spasennikov

### ERGONOMIC REQUIREMENTS STANDARDIZATION PROBLEMS DURING FORMATION OF NEW SYSTEMS, PRODUCTS AND INNOVATION TECHNOLOGIES

The paper reports the consideration of basic directions of the work in the field of the ergonomic support standardization of the development and operation of new systems, products and technologies. The story of conversion elaborations of ergonomic support for the sample creation of armament and military engineering is covered. It is shown that the development of

standards on ergonomics both at the international level and the national one is too slow, that has a negative impact upon competitive ability of industrial produce manufactured.

**Key words:** standardization, ergonomic support, standards and requirements, “man – techniques – environment” system.

Анализ отечественных и зарубежных исследований в сфере эргономики и дизайна показывает, что стандартизация является эффективным средством управления проектированием систем «человек – техника – среда», а также условий их функционирования. Соблюдение как общих, так и частных эргономических требований обеспечивает высокую эффективность операторской деятельности в чело-веко-машинных комплексах, способствует созданию комфортных и безопасных условий труда, сохранению здоровья и поддержанию необходимого уровня работоспособности [1; 5; 8; 11; 19 и др.].

Стандартизация эргономических норм и требований, как показано в целом ряде исследований [9; 13; 14; 16], предполагает систематическое осуществление следующего комплекса работ:

– сбор, оценка достоверности и систематизация эргономических данных, установление причинно-следственных связей и функциональных зависимостей между ними;

– анализ надёжности и валидности методов получения эмпирических данных;

– выявление запросов практики, определение практической значимости получаемой эмпирической и экспертной информации;

– унификация понятийно-категориального аппарата, методов и средств получения, обработки и хранения данных.

После распада СССР эргономические стандарты разрабатываются главным образом на основе международных стандартов ИСО (Международной организации по стандартизации).

В процессе проектирования новых систем, изделий и технологий эргономическое обеспечение разработки, как правило, отсутствует, и эргономика является скорее модным словом, чем инструментом. Тем не менее разработчики пытаются назвать свои изделия эргономичными в интересах формирования положительных установок потребителей при продвижении продукции на рынок. Анализ показывает, что в большинстве случаев разработчики и производители не имеют представления о существовании высокоуровневых стандартов по общим принципам проектирования, таких

как ИСО 2082 «Эргономика изделий повседневного использования». Данные стандарты представляют собой общие положения и рекомендации, которые не являются исчерпывающими для систем, изделий и технологий, поэтому необходимость в разработке частных эргономических требований и специализированных стандартов остаётся. На постсоветском пространстве специализированные стандарты являются морально устаревшими. Так, ГОСТ по холодильным установкам датируется 1987 годом, по электрическим чайникам – 1981 годом. В отечественных исследованиях по эргономике показано, что с учетом сроков материализации научных идей стандарты на конечные системы и изделия необходимо пересматривать и актуализировать не реже чем один раз в 10 лет, исходя из тенденций эргономического обеспечения разработки и эксплуатации промышленной продукции [16].

Объемы и темпы работ по стандартизации в сфере эргономики являются явно

недостаточными. Количество национальных стандартов, создаваемых на базе международных, составляет от семи до двенадцати в год, что делает Россию одной из отстающих стран с точки зрения конкурентоспособности разрабатываемых систем, изделий и технологий [3; 6; 8; 13; 22 и др.].

В табл. 1 приведен перечень из 89 основных межгосударственных и национальных стандартов по эргономике, используемых отечественными разработчиками и производителями в процессе эргономического обеспечения создания и эксплуатации систем, изделий и технологий.

Ввиду того что эргономика объединяет в себе такие науки, как системная инженерия (системотехника), дизайн и художественное конструирование, техническая эстетика, физиология и психология труда, гигиена и безопасность труда, анатомия и антропометрия, такое количество стандартов является недостаточным [2; 5; 10; 18; 23 и др.].

Таблица 1

Перечень основных национальных и межгосударственных стандартов по эргономике

№ п/п	Обозначение	Наименование стандарта
1	ГОСТ 30.001-83	Система стандартов эргономики и технической эстетики. Основные положения
2	ГОСТ 20.39.108-85	Комплексная система общих технических требований. Требования по эргономике, обитаемости и технической эстетике. Номенклатура и порядок выбора
3	ГОСТ 29.05.006-85	Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Трубы электронно-лучевые приемные. Общие эргономические требования
4	ГОСТ 27472-87	Средства автотранспортные специализированные. Охрана труда, эргономика. Требования
5	ГОСТ 27626-88	Лицевые части авиационных индикаторов и приборов. Общие эргономические требования
6	ГОСТ 28392-89	Мнемосхемы авиационные. Общие эргономические требования
7	ГОСТ Р 29.05.008-96	Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Рабочее место диспетчера служб управления воздушным движением. Общие эргономические требования
8	ГОСТ Р 29.08.004-96	Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Рабочее место диспетчера служб управления воздушным движением. Методы оценки соответствия общим эргономическим требованиям
9	ГОСТ Р 50923-96	Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения

Продолжение табл. 1

№ п/п	Обозначение	Наименование стандарта
10	ГОСТ Р 51341-99	Безопасность машин. Эргономические требования по конструированию средств отображения информации и органов управления. Часть 2. Средства отображения информации
11	ГОСТ Р 50949-2001	Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности
12	ГОСТ ИСО 8995-2002	Принципы зрительной эргономики. Освещение рабочих систем внутри помещений
13	ГОСТ Р ЕН 614-1-2003	Безопасность оборудования. Эргономические принципы конструирования. Часть 1. Термины, определения и общие принципы
14	ГОСТ Р 52324-2005	Эргономические требования к работе с визуальными дисплеями, основанными на плоских панелях. Часть 2. Эргономические требования к дисплеям с плоскими панелями
15	ГОСТ Р ИСО 9241-1-2007	Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDTs). Часть 1. Общее введение
16	ГОСТ Р ИСО 6385-2007	Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем
17	ГОСТ Р ИСО 7731-2007	Эргономика. Сигналы опасности для административных и рабочих помещений. Звуковые сигналы опасности
18	ОСТ Р ИСО 11399-2007	Эргономика тепловой окружающей среды. Принципы и применение признанных международных стандартов
19	ГОСТ Р ИСО 13406-1-2007	Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием плоскопанельных терминалов. Часть 1. Введение
20	ГОСТ Р ИСО 15534-3-2007	Эргономическое проектирование машин для обеспечения безопасности. Часть 3. Антропометрические данные
21	ГОСТ Р ИСО/ТУ 13732-2-2008	Эргономика термальной среды. Методы оценки реакции человека при контакте с поверхностями. Часть 2. Контакт с поверхностью умеренной температуры
22	ГОСТ Р ИСО 8996-2008	Эргономика термальной среды. Определение скорости обмена веществ
23	ГОСТ Р ИСО 9886-2008	Эргономика термальной среды. Оценка температурной нагрузки на основе физиологических измерений
24	ГОСТ Р ИСО 11226-2008	Система стандартов безопасности труда. Эргономика. Ручная обработка грузов. Статические рабочие положения. Общие требования
25	ГОСТ Р 53452-2009/ISO /TR 19358:2002	Эргономика. Проектирование и применение испытаний речевых технологий
26	ГОСТ Р ИСО 7730-2009	Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта
27	ГОСТ Р ИСО 9355-1-2009	Эргономические требования к проектированию дисплеев и механизмов управления. Часть 1. Взаимодействие с человеком

Продолжение табл. 1

№ п/п	Обозначение	Наименование стандарта
28	ГОСТ Р ИСО 9355-2-2009	Эргономические требования к проектированию дисплеев и механизмов управления. Часть 2. Дисплеи
29	ГОСТ Р 53453-2009/ISO / TS 14415:2005	Эргономика термальной среды. Применение требований стандартов к людям с особыми требованиями
30	ГОСТ Р ИСО 15534-1-2009	Эргономическое проектирование машин для обеспечения безопасности. Часть 1. Принципы определения размеров проемов для доступа всего тела человека внутрь машины
31	ГОСТ Р ИСО 9241-110-2009	Эргономика взаимодействия «человек-система». Часть 110. Принципы организации диалога
32	ГОСТ Р 53454.1-2009/ISO/ TS 20646-1:2004	Эргономические процедуры оптимизации локальной мышечной нагрузки. Часть 1. Рекомендации по снижению нагрузки
33	ГОСТ Р ИСО 9241-2-2009	Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 2. Требования к производственному заданию
34	ГОСТ Р ИСО 9241-4-2009	Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 4. Требования к клавиатуре
35	ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009	Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора
36	ГОСТ Р ИСО 15537-2009	Эргономика. Принципы отбора испытателей для проверки антропометрических свойств промышленной продукции и конструкций
37	ГОСТ Р ИСО 10075-2-2009	Эргономические принципы обеспечения адекватности умственной нагрузки. Часть 2. Принципы проектирования
38	ГОСТ Р ИСО 10075-3-2009	Эргономические принципы обеспечения адекватности умственной нагрузки. Часть 3. Принципы и требования к методам измерений и оценке умственной нагрузки
39	ГОСТ Р ИСО 11228-1-2009	Система стандартов безопасности труда. Эргономика. Ручная обработка грузов. Часть 1. Поднятие и переноска. Общие требования
40	ГОСТ Р ИСО 9241-11-2010	Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 11. Руководство по обеспечению пригодности использования
41	ГОСТ Р ИСО 14915-1-2010	Эргономика мультимедийных пользовательских интерфейсов. Часть 1. Принципы проектирования и структура
42	ГОСТ Р ИСО 11064-7-2010	Эргономическое проектирование центров управления. Часть 7. Принципы оценки
43	ГОСТ Р ИСО 15536-1-2010	Эргономика. Компьютерные манекены и модели тела. Часть 1. Общие требования
44	ГОСТ Р ИСО 15536-2-2010	Эргономика. Компьютерные манекены и модели тела. Часть 2. Верификация функций и валидация размеров компьютерного манекена для систем моделирования

Продолжение табл. 1

№ п/п	Обозначение	Наименование стандарта
45	ГОСТ Р ИСО 9355-3-2010	Эргономические требования к проектированию дисплеев и механизмов управления. Часть 3. Механизмы управления
46	ГОСТ Р 53962.1-2010/ISO/TS 14505-1:2007	Эргономика термальной среды. Оценка термальной среды в транспортном средстве. Часть 1. Принципы и методы оценки термального стресса
47	ГОСТ Р ИСО 14505-3-2010	Эргономика термальной среды. Оценка термальной среды в транспортном средстве. Часть 3. Оценка температурного комфорта с привлечением испытателей
48	ГОСТ Р ИСО 10075-2011	Эргономические принципы обеспечения адекватности умственной нагрузки. Основные термины и определения
49	ГОСТ Р ИСО 15534-2-2011	Эргономическое проектирование машин для обеспечения безопасности. Часть 2. Принципы определения размеров отверстий доступа
50	ГОСТ Р ИСО 16121-1-2011	Эргономика транспортных средств. Требования к рабочему месту водителя автобуса. Часть 1. Основные требования
51	ГОСТ Р ИСО 16121-2-2011	Эргономика транспортных средств. Требования к рабочему месту водителя автобуса. Часть 2. Обзорность
52	ГОСТ Р ИСО 16121-3-2011	Эргономика транспортных средств. Требования к рабочему месту водителя автобуса. Часть 3. Информационные устройства и элементы управления
53	ГОСТ Р ИСО 16121-4-2011	Эргономика транспортных средств. Требования к рабочему месту водителя автобуса. Часть 4. Рабочая среда кабины
54	ГОСТ Р ИСО 20282-1-2011	Эргономика изделий повседневного использования. Часть 1. Требования к конструкции элементов управления с учетом условий использования и характеристик пользователя
55	ГОСТ Р ИСО 4040-2011	Эргономика транспортных средств. Расположение элементов ручного управления, индикаторов и сигнализаторов в автомобиле
56	ГОСТ Р ИСО 12214-2011	Эргономика транспортных средств. Стереотипы направлений движения для элементов ручного управления автомобиля
57	ГОСТ Р ИСО 15535-2012	Эргономика. Основные требования к созданию антропометрических баз данных
58	ГОСТ Р 55241.1-2012/ISO/TR 9241-100:2010	Эргономика взаимодействия «человек - система». Часть 100. Введение в стандарты, относящиеся к эргономике программных средств
59	ГОСТ Р ИСО 9241-210-2012	Эргономика взаимодействия «человек - система». Часть 210. Человеко-ориентированное проектирование интерактивных систем
60	ГОСТ Р 55241.3-2012	Эргономика взаимодействия «человек - система». Часть 308. Дисплеи с электронной эмиссией за счет поверхностной проводимости (SED)
61	ГОСТ Р 55241.2-2012/ISO/TR 9241-309:2008	Эргономика взаимодействия «человек - система». Часть 309. Дисплеи на органических светоизлучающих диодах
62	ГОСТ Р 55241.4-2012	Эргономика взаимодействия «человек - система». Часть 310. Видимость, эстетичность и эргономичность дефектов пикселей

Продолжение табл. 1

№ п/п	Обозначение	Наименование стандарта
63	ГОСТ Р 55236.2-2012/ ISO/ TS 20282-2:2006	Эргономика изделий повседневного использования. Часть 2. Метод испытаний изделий с интуитивно понятным управлением
64	ГОСТ Р 55236.3-2012/ ISO/ PAS 20282-3:2007	Эргономика изделий повседневного использования. Часть 3. Метод испытаний потребительских товаров
65	ГОСТ Р 55236.4-2012/ ISO/ PAS 20282-4:2007	Эргономика изделий повседневного использования. Часть 4. Метод испытаний для проверки удобства установки и монтажа
66	ГОСТ Р ИСО 15007-1-2012	Эргономика транспортных средств. Оценка зрительного поведения водителя с учетом информационно-управляющей системы транспортного средства. Часть 1. Определения и параметры
67	ГОСТ Р 55237.2-2012/ISO/ TS 15007-2:2001	Эргономика транспортных средств. Оценка зрительного поведения водителя с учетом информационно-управляющей системы транспортного средства Часть 2. Оборудование и процедуры
68	ГОСТ Р 55237.1-2012/ ISO/ TS 16951:2004	Эргономика транспортных средств. Эргономические аспекты информационно-управляющей системы транспортного средства. Процедуры определения приоритета сообщений водителю
69	ГОСТ Р ИСО 15005-2012	Эргономика транспортных средств. Эргономические аспекты информационно-управляющей системы транспортного средства. Принципы управления диалогом и процедуры проверки соответствия
70	ГОСТ Р ИСО 15006-2012	Эргономика транспортных средств. Эргономические аспекты информационно-управляющей системы транспортного средства. Требования к представлению звуковой информации внутри транспортного средства
71	ГОСТ Р ИСО 15008-2012	Эргономика транспортных средств. Эргономические аспекты информационно-управляющей системы транспортного средства. Требования к представлению визуальной информации внутри транспортного средства и методы их проверки
72	ГОСТ Р ИСО 24500-2012	Эргономическое проектирование. Звуковые сигналы в потребительских товарах
73	ГОСТ Р ИСО 24501-2012	Эргономическое проектирование. Уровни звукового давления сигналов в потребительских товарах
74	ГОСТ Р ИСО 24502-2012	Эргономическое проектирование. Требования к яркости и контрастности цветных источников света для людей различных возрастных категорий
75	ГОСТ EN 894-1-2012	Безопасность машин. Эргономические требования к оформлению индикаторов и органов управления. Часть 1. Общие руководящие принципы при взаимодействии оператора с индикаторами и органами управления
76	ГОСТ EN 894-3-2012	Безопасность машин. Эргономические требования к оформлению индикаторов и органов управления. Часть 3. Органы управления

Окончание табл. 1

№ п/п	Обозначение	Наименование стандарта
77	ГОСТ EN 614-2-2012	Безопасность машин. Эргономические принципы проектирования. Часть 2. Взаимосвязь между конструкцией машин и рабочими задачами
78	ГОСТ 31608-2012	Машины напольного безрельсового электрифицированного транспорта. Рабочее место водителя. Общие эргономические требования
79	ГОСТ Р ИСО 7250-1-2013	Эргономика. Основные антропометрические измерения для технического проектирования. Часть 1. Определения и основные антропометрические точки
80	ГОСТ Р ИСО 9241-400-2013	Эргономика взаимодействия «человек - система». Часть 400. Принципы и требования к устройствам физического ввода
81	ГОСТ Р ИСО 9921-2013	Эргономика. Оценка речевой связи
82	ГОСТ Р ИСО 11064-6-2013	Эргономическое проектирование центров управления. Часть 6. Требования к окружающей среде
83	ГОСТ Р ИСО 13732-3-2013	Эргономика термальной среды. Методы оценки реакции человека при контакте с поверхностями. Часть 3. Контакт с холодными поверхностями
84	ГОСТ Р ИСО 14505-2-2013	Эргономика термальной среды. Оценка термальной среды в транспортном средстве. Часть 2. Определение эквивалентной температуры
85	ГОСТ Р ИСО 14915-2-2013	Эргономика мультимедийных пользовательских интерфейсов. Часть 2. Навигация и управление мультимедийными средствами
86	ГОСТ Р ИСО 24503-2013	Эргономическое проектирование. Тактильные точки и штрихи на потребительских товарах
87	ГОСТ Р ИСО 28802-2013	Эргономика физической среды. Оценка физической среды на основе измерений физических характеристик и субъективных оценок людей
88	ГОСТ Р ИСО 20685-2013	Эргономика. Методология трехмерного сканирования для разработки совместимых с международными антропометрическими баз данных
89	ГОСТ РВ 0029-05.024-2014	Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Автоматизированное рабочее место оператора образца военной техники. Общие эргономические требования

Как видно из табл. 1, основной проблемой эргономической стандартизации является отсутствие стандартов по целому ряду важных направлений, таких как:

- авиационная и космическая эргономика;
- психология труда в экстремальных условиях деятельности;

- эргономика для лиц с ограниченными возможностями;
- эргономика систем и изделий бытового назначения.

По нашему мнению, стандартизация в сфере эргономики и дизайна может рассматриваться и как самостоятельное научное направление в интересах получения новых знаний, и как промежуточная дея-

тельность по внедрению стандартов для эффективного управления экономическими и социальными процессами.

Перспективным направлением работ по стандартизации является эргономическая оценка (экспертиза) стандартов, которая служит одним из способов повышения их качества. Она должна принимать значительно большие масштабы в связи с увеличивающимся количеством разработок стандартов на изделия, в которых от эргономических показателей существенно зависит качество изделия в целом [4; 7; 12; 17; 24].

В табл. 2 представлена разработанная в отечественной военной эргономике советского периода многоуровневая система разработки нормативно-технической документации, отражающая основные направления эргономического обеспечения создания и эксплуатации образцов вооружения и военной техники. Разработанная конверсионная система нормативно-технической документации по эргономике базируется на обеспечении таких частных показателей эргономичности техники, как управляемость, освоемость, обслуживаемость и обитаемость. Методология их оценки раскрыта в работах [1; 6; 13; 14; 18; 21; 24].

Представленные в табл. 2 направления конверсионной разработки эргономических стандартов основаны на следующем определении эргономического обеспечения: «Эргономическое обеспечение – это комплекс взаимосвязанных мероприятий, методов и средств, направленных на повышение качества функционирования и сокращение сроков освоения изделий и систем за счет рационального согласования характеристик человека, характеристик технических средств и параметров рабочей среды» [24].

В терминологическом стандарте ГОСТ 0100-001-2008 даны определения эргономического обеспечения (ЭО) разработки образца и ЭО эксплуатации образца:

1. ЭО разработки образца – совокупность организационно-технических мероприятий, направленных на учет возможностей человека при исследовании и обосновании разработки, собственно разработке и производстве образца.

2. ЭО эксплуатации образца – совокупность организационно-технических ме-

роприятий, направленных на обеспечение требуемого качества деятельности оператора и его профессионального долголетия в процессе эксплуатации образца в интересах достижения требуемой эффективности применения образца.

Как показано в наших исследованиях [11; 12; 14; 18 и др.], основой обоснования эргономических требований на ранних стадиях проектирования систем «человек – техника – среда» является моделирование операторской деятельности с учетом ряда специальных способностей:

1. Функционирование моделей с целью разработки эргономических требований к процессу деятельности и оценки ее качества представляет моделирование целостной деятельности, т.е. охватывает всю возможную совокупность операций (действий), выполняемых оператором.

2. Модели целостной деятельности могут включать в свой состав модель имитации поведения человека в ходе деятельности. В этом случае задачей математической модели является только получение информации, необходимой для деятельности оператора, и постоянная оценка её качества.

3. Модель должна содержать описание деятельности оператора в виде логико-временной последовательности операций, учитывающей алгоритм деятельности во всём возможном диапазоне условий с обязательным контролем интервалов в работе, вызванных функционированием технических средств и деятельностью взаимодействующих с ними операторов.

4. Характеристики деятельности оператора, воспроизводимые в моделях, должны сохранять своюственную им нестационарность и нелинейность для обеспечения объективности анализа влияния деятельности на показатели качества системы и получения полного представления о динамическом взаимодействии ее элементов.

Следует отметить, что моделирование деятельности на ранних стадиях проектирования систем осуществляют крайне редко. Стандарты становятся эффективным средством решения прикладных задач эргономики в тех случаях, когда их применение сочетается с решением задачи содержательного моделирования деятельности человека и условий ее осуществления.

Таблица 2

Основные направления конверсионной разработки эргономического обеспечения создания и эксплуатации систем, изделий и технологий

Первый уровень	Разработка основополагающих стандартов			
	Система стандартных справочных данных по человеческому фактору; стандартизация эргономических норм, требований и показателей; объекты стандартизации в эргономике; методы определения функциональных зависимостей в системе «человек – техника – среда»; классификация видов деятельности в системе «человек – техника – среда»; основные положения эргономического обеспечения разработки и эксплуатации систем, изделий и технологий			
Второй уровень	Классификация и разработка номенклатуры общих эргономических требований			
	к организации деятельности	к техническим средствам деятельности	к условиям функционирования системы	Классификация и разработка номенклатуры показателей качества
Третий уровень	Алгоритмы деятельности; информационное обучение деятельности; методы профобучения; режим труда и отдыха; размещение рабочих мест	Конструкция рабочего места; пространственная организация рабочего места; структура информационной модели; элементы рабочего места	Физико-химические и психофизиологические условия внешней среды	Групповые показатели эргономичности
Четвертый уровень	Взаимодействия «человек - человек», «человек - коллектив», «человек - среда»	Эргономические требования к элементам рабочего места; оргтехника; рабочие сиденья; средства отображения информации; органы управления		Методы оценки (экспертный, расчетный, экспериментальный); методы определения веса эргономической оценки в общей оценке качества; методы назначения весомости эргономических показателей; методы подготовки специалистов по экспертной эргономической оценке
Пятый уровень	Внедрение эргономических норм и требований в стандарты на технические требования к системам, изделиям и технологиям			
	Внедрение эргономических показателей качества в стандарты на аттестуемую продукцию			

Только в этом случае использование стандартов позволит обеспечить высокий эргономический уровень разработки систем, изделий и технологий.

Эргономика, дизайн, техническая эстетика давно доказали свою пользу и практичесность. Проектирование систем, изделий и технологий без учета эргономических знаний приводит к тому, что неэргономичные проекты в современных условиях об-

речены на провал: они не пользуются спросом у потребителей, вызывают незапланированные затраты, способствуют возникновению аварий и катастроф, отрицательно влияют на здоровье и благополучие людей. Для эффективного развития стандартизации в области эргономики и дизайна нужна заинтересованность всех сторон: государства, бизнеса и экспертного сообщества.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багрецов, С.А. Технико-экономическое обоснование требований к системам функциональной диагностики операторов современных человеко-машинных комплексов / С.А. Багрецов, Ю.А. Шашлюк // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. - 2015. - № 1 (72). - С. 52-59.
2. Великанов, В.С. Возможности виртуального прототипирования в эргономическом реинжиниринге рабочих мест горных и строительных машин / В.С. Великанов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2017. - № 5-2. - С. 211-216.
3. Волков, Е.А. Изучение эргономических характеристик технологических машин как фактора оценки эффективности системы «человек — машина — среда» / Е.А. Волков // Безопасность труда в промышленности. - 2013. - № 6. - С. 32-34.
4. Назаренко, Н.А. Подготовка и переподготовка эргономистов / Н.А. Назаренко, П.И. Падерно, И.Г. Городецкий // Человеческий фактор в сложных технических системах и средах: тр. 2-й междунар. науч.-практ. конф. - 2016. - С. 58-65.
5. Данилов, О.Е. Эргономика обучающих человеко-машинных систем / О.Е. Данилов // Дистанционное и виртуальное обучение. - 2016. - № 8 (110). - С. 25-31.
6. Евенко, В.В. Проблема объекта в отечественных инженерно-психологических и эргономических исследованиях: ретроспективный анализ / В.В. Евенко, Н.В. Женчевская, В.В. Спасенников // Инновационные методы и модели в экономической психологии, эргономике, производственном менеджменте: материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. - 2013. - С. 35-57.
7. Ерохин, Д.В. Формирование общекультурных и профессиональных компетенций в процессе подготовки магистрантов по профилю «Инновационный менеджмент» / Д.В. Ерохин, В.В. Спасенников // Менеджмент в России и за рубежом. - 2014. - № 6. - С. 61-70.
8. Женчевская, Н.В. Сравнительный анализ охраны результатов инновационной деятельности в России и за рубежом / Н.В. Женчевская, В.В. Спасенников // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2015. - № 3. - С. 190-196.
9. Зараковский, Г.М. Опыт дизайн-эргономического проектирования гибких автоматизированных заводов в машиностроении / Г.М. Зараковский // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. - 2009. - № 3. - С. 48-55.
10. Кондратенко, С.В. Анализ динамики патентования изобретений в сфере удовлетворения жизненных потребностей человека / С.В. Кондратенко, А.А. Кузьменко, В.В. Спасенников // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 4 (57). - С. 183-191.
11. Кондратенко, С.В. Методология оценки деятельности операторов в человеко-машинных системах / С.В. Кондратенко, А.А. Кузьменко, В.В. Спасенников // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 1 (54). - С. 261-270.
12. Кондратенко, С.В. Методы анализа и моделирования деятельности операторов в процессе эргономического обеспечения разработки и эксплуатации человеко-машинных комплексов / С.В. Кондратенко, В.В. Спасенников // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2015. - № 1 (45). - С. 87-94.
13. Котенко, К.А. Проблемы оценки влияния реализации эргономических требований на экономическую эффективность функционирования человеко-машинных комплексов / К.А. Котенко, В.В. Спасенников // Экономический анализ: теория и практика. - 2016. - № 4 (451). - С. 149-163.
14. Львов, В.М. Инженерно-психологические вопросы проектирования деятельности операторов / В.М. Львов, В.В. Павлюченко, В.В. Спасенников // Психологический журнал. - 1989. - Т. 10. - № 5. - С. 66-74.
15. Меденков, А.А. Психофизиологический анализ — методологическая основа развития психологии и эргономики / А.А. Меденков // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. - 2017. - № 3 (83). - С. 23-27.
16. Окрепилов, В.В. Обеспечение общества информацией о влиянии стандартизации на качество жизни / В.В. Окрепилов, Г.Н. Иванова // Про-

- блемы развития территории. - 2012. - № 6 (62). - С. 20-30.
17. Слабко, К.К. Стандартизация в области эргономики / К.К. Слабко, Н.М. Мелентьева // Психология труда, инженерная психология и эргономика - 2014: тр. междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А.Н. Анохина, П.И. Падерно, С.Ф. Сергеева. - 2014. - С. 42-49.
18. Спасенников, В.В. Анализ и проектирование групповой деятельности в прикладных психологических исследованиях / В.В. Спасенников. - М.: Институт психологии РАН, 1992. - 202 с.
19. Спасенников, В.В. Концептуальный подход к процессу обоснования структуры института экономической психологии и эргономики в техническом вузе / В.В. Спасенников // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. - 2013. - № 3. - С. 87-93.
20. Спасенников, В.В. Экономическая психология и эргономика в обеспечении успешности инновационной деятельности / В.В. Спасенников, Г.Ф. Голубева // Экономическая психология: прошлое, настоящее, будущее. - 2014. - № 2. - С. 247-258.
21. Спасенников, В.В. Экономико-психологические особенности измерения уровня интеллектуального капитала конкурирующих предприятий / В.В. Спасенников, С.В. Кондратенко // Экономическая психология: прошлое, настоящее, будущее. - 2016. - № 3-1. - С. 250-257.
22. Спасенников, В.В. Экономико-психологический анализ успешности изобретательской деятельности / В.В. Спасенников // Психолого-экономические исследования. - 2016. - Т. 3-9. - № 3. - С. 79-93.
23. Чайнова, Л.Д. Эргодизайн как современная инновационная технология человеко-ориентированного проектирования / Л.Д. Чайнова, Т.Г. Богатырева // Дизайн-ревю. - 2008. - № 1-2. - С. 33-42.
24. Шлаен, П.Я. Типовая структура технологии обоснования эргономического облика создаваемого человеко-машинного комплекса / П.Я. Шлаен, В.М. Львов // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. - 2004. - № 3. - С. 6-9.

1. Bagretsov, S.A. Technical and economic assessment of requirements to systems of operator's functional diagnostics of modern man-machine complexes / S.A. Bagretsov, Yu.A. Shashlyuk // *Human Factor: Problems of Psychology and Ergonomics*. – 2015. No.1 (72). – pp. 52-59.
2. Velikanov, V.S. Potentialities of virtual prototyping in workplaces ergonomic re-engineering of mining and construction equipment / V.S. Velikanov // *International Journal of Applied and Fundamental Researches*. – 2017. – No.5-2. – pp. 211-216.
3. Volkov, E.A. Study of processing machine ergonomic characteristics as factor of efficiency assessment of “man-machine-environment” system / E.A. Volkov // *Labor Safety in Industry*. – 2013. – No.6. – pp. 32-34.
4. Nazarenko, N.A. Ergonomics experts' training and retraining / N.A. Nazarenko, P.I. Paderno, I.G. Gorodetsky // *Human Factor in Complex Engineering Systems and Environment: Transactions of the II-d Inter. Scientif.-Pract. Conf.* – 2016. – pp. 58-65.
5. Danilov, O.E. Ergonomics of teaching man-machine systems / O.E. Danilov // *Remote and Virtual Training*. 2016. – No.8 (110). – pp. 25-31.
6. Yevenko, V.V. Problem of object in domestic engineering psychological and ergonomic researches: retrospective analysis / V.V. Yevenko, N.V. Zhenchевская, V.V. Spasennikov // *Innovation Methods and Models in Economic Psychology, Ergonomics, Industrial Management: Transactions of All-Russian Scientific Conf. With Inter. participation*. – 2013. – pp. 35-57.
7. Yerokhin, D.V. Formation of general cultural and professional competences during training of Master degree students for specialty of “Innovation Management” / D.V. Yerokhin, V.V. Spasennikov //

- Management in Russia and Abroad. – 2014. – No.6. – pp. 61-70.
- Zhenchevskaya, N.V. Comparative analysis of innovation activity results safety in Russia and Abroad / N.V. Zhenchevskaya, V.V. Spasennikov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2015. – No.3. – pp.190-196.
- Zarakovsky, G.M. Experience in design-ergonomic designing of flexible automated plants in mechanical engineering / G.M. Zarakovskiy // *Human Factor: Problems of Psychology and Ergonomics*. – 2009. – No.3. – pp. 48-55.
- Kondratenko, S.V. Analysis of dynamics in invention patenting in sphere of human life needs satisfaction / S.V. Kondratenko, A.A. Kuzmenko, V.V. Spasennikov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. No. 4 (57). – pp. 183-191.
- Kondratenko, S.V. Methodology in operator's activity assessment in man-machine systems / S.V. Kondratenko, A.A. Kuzmenko, V.V. Spasennikov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. – No.1 (54). – pp. 261-270.
- Kondratenko, S.V. Methods of analysis and modeling of operators' activity during ergonomic support of development and operation of man-machine complexes / S.V. Kondratenko, V.V. Spasennikov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2015. No.1 (45). – pp. 87-94.
- Kotenko, K.A. Problems of assessment of ergonomic requirements realization impact upon efficiency of man-machine complexes functioning / K.A. Kotenko, V.V. Spasennikov // *Economic Analysis: Theory and Practice*. – 2016. – No.4 (451). – pp. 149-163.
- Lvov, V.M. Engineering psychological problems in operators' activity designing / V.M. Lvov, V.V.

- Pavlyuchenko, V.V. Spasennikov // *Psychological Journal*. – 1989. – Vol. 10. No.5. – pp. 66-74.
15. Medenkov, A.A. Psycho-physiological analysis – methodological basis for psychology and ergonomics development / A.A. Medenkov // *Human Factor: Problems of Psychology and Ergonomics*. – 2017. – No.3 (83). – pp. 23-27.
16. Okrepilov, V.V. Society provision with information of standardization impact upon life quality / V.V. Okrepilov, G.N. Ivanova // *Territory Development Problems*. – 2012. – No.6 (62). – pp. 20-30.
17. Slabko, K.K. Standardization in field of economics / K.K. Slabko, N.M. Melentieva // *Psychology of Labor, Engineering Psychology and Ergonomics – 2014: Transactions of the Inter. Scientif.-Pract. Conf.* / under the editorship of A.N. Anokhin, P.I. Paderno, S.F. Sergeev. – 2014. – pp. 42-49.
18. Spasennikov, V.V. *Analysis and Design of Group Activity in Applied Psychological Researches* / V.V. Spasennikov. – M.: Institute of Psychology of the RAS, 1992. – pp. 202.
19. Spasennikov, V.V. Conceptual approach to process of structure substantiation for institute of economic psychology and ergonomics in engineering college / V.V. Spasennikov // *Human Factor: Problems of Psychology and Ergonomics*. – 2014. – No.3. – pp. 6-9.
20. Spasennikov, V.V. Economic psychology and ergonomics in assurance of innovation activity successfulness / V.V. Spasennikov, G.F. Golubeva // *Economic Psychology: Past, Present, Future*. – 2016. – No.3-1. – pp. 247-258.
21. Spasennikov, V.V. Economic-psychological peculiarities in measurement of competitive enterprises intelligent capital / V.V. Spasennikov, S.V. Kondratenko // *Economic Psychology: Past, Present, Future*. – 2016. – No.3-1. – pp. 250-257.
22. Spasennikov, V.V. Economic-psychological analysis of successfulness in invention activity / V.V. Spasennikov // *Psychological Economical Investigations*. – 2016. – Vol.3-9. – No.3. pp. 79-93.
23. Chainova, L.D. Ergo-design as modern innovation technology of human-directed designing / L.D. Chainova, T.G. Bogatyryova // *Design-review*. – 2008. No.1-2. – pp. 33-42.
24. Shlaen, P.Ya. Standard structure of ergonomic image substantiation technology for man-machine complex under formation / P.Ya. Shlaen, V.M. Lvov // *Human Factor: Problems of Psychology and Ergonomics*. – 2004. – No.3. – pp. 6-9.

*Статья поступила в редакцию 11.12.17.*

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

#### Сведения об авторах:

**Богомолов Станислав Андреевич**, магистрант Брянского государственного технического университета, e-mail: [solobai32@gmail.com](mailto:solobai32@gmail.com).

**Bogomolov Stanislav Andreevich**, Master degree student, Bryansk State Technical University, e-mail: [solobai32@gmail.com](mailto:solobai32@gmail.com).

**Спасенников Валерий Валентинович**, д.психол.н., профессор Брянского государственного технического университета, e-mail: [spas1956@mail.ru](mailto:spas1956@mail.ru).

**Spasennikov Valery Valentinovich**, D. Psychol., Bryansk State Technical University, e-mail: [spas1956@mail.ru](mailto:spas1956@mail.ru).

## Инженерная мысль России: личности, идеи, разработки

УДК 62-05

DOI: 10.12737/article\_5a827d692a01a2.94477528

А.В. Киричек, В.А. Лебедев, А.В. Морозова, Д.Е. Тарасов

### БАБИЧЕВ АНАТОЛИЙ ПРОКОФЬЕВИЧ - «МИРОВОЙ ЛИДЕР В ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ВИБРАЦИИ...»

Представлены результаты анализа деятельности научной школы «Вибротехнология» Донского государственного технического университета, а также научный обзор публикаций ее руководителя - профессора Бабичева А.П., который прошел профессиональный путь от токаря до доктора технических наук, «мирового лидера в исследовании процессов вибрации и их использования в производстве...», члена-корреспондента АТН РФ, действительного члена Американского химического обще-

ства (ACS), члена редколлегий нескольких ведущих научных изданий России и ближнего зарубежья, чья плодотворная научная деятельность отмечена многочисленными наградами, в том числе Золотой медалью Международного общества инженеров-технологов (SME, 2004, USA).

**Ключевые слова:** вибрационная технология, Бабичев Анатолий Прокофьевич, отделочно-зачистная обработка деталей, обработка деталей в гранулированных средах.

A.V. Kirichek, V.A. Lebedev, A.V. Morozova, D.E. Tarasov

### ANATOLY PROKOFIEVICH BABICHEV – “WORLD LEADER IN INVESTIGATIONS OF VIBRATION PROCESSES...”

The results of the analysis on the activities of the “Vibro-technology” scientific school of the Don State Technical University, and also a scientific review of publications of Prof. A.P. Babichev, its chief, who passed a professional way from a turner to a D. Eng., “a world leader in investigations of vibration processes and their use in production...”, a Corresponding Member of the AES of the RF, a Full Corresponding Member of the American Chemical Society (ACS), a mem-

ber of editorial boards of some leading scientific editions of Russia and CIS countries, and for his fruitful scientific work he has been conferred many decorations upon, including a gold medal of the International Society of Engineer-Technologists (SME, 2004, USA) are presented.

**Key words:** vibration technology, Anatoly Prokofievich Babichev, parts finish dressing, parts processing in granulated media.

#### Введение

28 февраля 2018 года исполняется 90 лет заслуженному деятелю науки и техники РФ, профессору Донского государственного технического университета (ДГТУ), доктору технических наук Бабичеву Анатолию Прокофьевичу, основателю и организатору широкого научного направления, получившего название «Вибрационная технология».

Заслуги профессора А.П. Бабичева перед отечественной наукой получили заслуженное признание в нашей стране и за рубежом. По оценке американского библиографического указателя, «доктор А.П. Бабичев - мировой лидер в исследовании процессов вибрации и их использования в производстве...». Он является членом-корреспондентом АТН РФ, действитель-

ным членом Американского химического общества (ACS), членом секции Международного комитета по финишным технологиям обработки прецизионных поверхностей WEST-R, почетным профессором Донского государственного технического университета и многих университетов России, председателем проблемного совета «Вибрационная технология» ЮРО АТН РФ, руководителем постоянно действующего регионального семинара «Применение низкочастотных колебаний в технологических целях», членом редакционных коллегий центральных журналов – «Упрочняющие технологии и покрытия» (Россия), «Вибрации в технике и технологиях» (Украина). Плодотворная научная деятельность А.П. Бабичева отмечена

многочисленными наградами, в том числе Золотой медалью Международного обще-

ства инженеров-технологов (SME, 2004, USA).

### Путь в большую науку: от токаря до ученого

А.П. Бабичев родился в 1928 году в станице Лихая. Свой трудовой путь начал в период Великой Отечественной войны токарем паровозоремонтного депо (1943 г.). В 1949 году окончил авиационный техникум, с 1950 по 1953 год служил в рядах Советской армии, а в 1954 году с отличием закончил Всесоюзный заочный политехнический институт.

С 1949 по 1960 год его трудовая деятельность связана с п/я 13 (в настоящее время ПАО «Роствертол»), где он прошёл путь от конструктора до начальника цеха. В 1962 году А.П. Бабичев перешёл на работу в НИИ ТМ в качестве начальника отдела мехобработки. Уже в этот период в полной мере проявился талант ученого-экспериментатора и начали закладываться

основы будущей научной школы. В 1974 году им успешно защищена докторская диссертация на тему «Исследование технологических основ процесса обработки деталей в среде колеблющихся тел (вибрационной обработки) с использованием низкочастотных вибраций».

С 1968 года и по сегодняшний день А.П. Бабичев работает в Донском государственном техническом университете. В 1974 он возглавил одну из ведущих кафедр университета - кафедру «Технология машиностроения» и руководил ею до 1994 года. Центром научных исследований вибрационных технологий стал созданный при кафедре и возглавляемый им научно-исследовательский отдел.

### НИИ «Вибротехнология»

В 2008 году научно-исследовательский отдел кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета преобразуется в НИИ «Вибротехнология». На базе результатов многолетних научных исследований разработаны и внедрены в производство современные технологические процессы финишной обработки деталей, а также широкая номенклатура оборудования и рабочих сред для их осуществления. Научно-экспериментальными и производственными базами для внедрения научных разработок кафедры являлись более 100 предприятий различной отраслевой направленности, среди которых ПО «Ростсельмаш», Новочеркасский электровозостроительный завод, ОАО «Роствертол», тракторные, станкостроительные, авиационные, подшипниковые, автомобильные заводы и др. В области проводимых научных исследований и подготовки научных кадров кафедра активно развивает творческие связи с учеными вузов, академий и НИИ.

Здесь под руководством профессора А.П. Бабичева ведется большая научно-исследовательская работа по актуальным

проблемам технологии машиностроения, имеющим международное значение, создан научный центр вибрационной технологии, включающий НИИ «Вибротехнология», госбюджетные и хозрасчетные подразделения ДГТУ. Много внимания уделяется воспитанию и подготовке инженерных и научных кадров. Учениками А.П. Бабичева успешно защищено 7 докторских и 60 кандидатских диссертаций.

Профессор А.П. Бабичев - автор свыше 500 научных работ, 100 изобретений, 11 монографий. Наиболее известными из них являются следующие.

«Основы вибрационной технологии» (1998 г.): представлен обширный материал, отражающий результаты и опыт практического применения процессов, основанных на использовании вибрационного воздействия на обрабатываемые детали, материалы и среды с различными свойствами; показаны различные аспекты проблемы вибрационной технологии (теоретическое обоснование и общие закономерности, конструкторские и технологические аспекты, практическое применение и технико-экономические характеристики); предпринята попытка формирования

обобщённого подхода к сущности процессов, основанных на использовании колебаний различного спектра; широко представлена сфера применения вибраций в технологии различных отраслей производства и ремонта, строительства и горнодобывающей промышленности, медицины и биологии, сельскохозяйственного производства и пищевой промышленности [1].

«Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей» (2010 г.): рассмотрен комплекс вопросов, связанных с применением вибрационных технологий для осуществления отделочно-зачистной обработки широкой номенклатуры деталей машин, приборов и инструментов, а также вопросы повышения производительности техпроцессов и качества поверхности, механизации и автоматизации операций отделочно-зачистной обработки [2].

«Инструментальное обеспечение процессов обработки деталей в гранулированных средах» (2011 г.): рассмотрены вопросы инструментального обеспечения широкого спектра методов обработки деталей (машин, приборов, инструментов) в гранулированных (абразивных, металлических, полимерных, органических) средах на различных технологических операциях (отделочно-зачистных, упрочняющих, нанесения покрытий и др.), в частности вопросы обеспечения производительности обработки и требуемого качества поверхности, характеристика и классификация гранулированных сред, условия их эффективного применения, технология и источники получения [3].

«Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей» (2012 г.): отражен

опыт теоретико-экспериментальных исследований и практической апробации вибрационной механохимии в процессах обработки и покрытий деталей; в монографии рассмотрены особенности протекания процессов взаимодействия внешней среды различного состава и обрабатываемой поверхности при выполнении операций отделочно-упрочняющей обработки и образования некоторых видов покрытий (цинковых, оксидных, твердосмазочных); дано обоснование технологических возможностей вибрационной механохимии для использования в технологии металлообработки, приведены результаты исследований и примеры обработки некоторых типов деталей [4].

«Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей» (2006 г.): рассмотрен комплекс вопросов, связанных с применением технологических методов обработки, основанных на использовании эффекта вибрационного (виброударного) воздействия на обрабатываемые детали и обрабатывающие среды, для повышения интенсивности процесса, качества поверхности и эксплуатационных свойств детали; представлены примеры обработки некоторых типов деталей и результаты сравнительных испытаний эксплуатационных свойств (усталостной прочности, износостойкости, контактной усталости, коррозионной стойкости) [5].

Профессор А.П. Бабичев является автором ряда изобретений [6-9].

Он был организатором и участником многих научных и научно-практических конференций, проводимых как в различных вузах России, так и за рубежом (рисунок).



Рис. Участники X международной научно-технической конференции «Технология-2007» (Стокгольм - Хельсинки)

### Заключение

Доктор технических наук, профессор А.П. Бабичев и в настоящее время продолжает свою многогранную научную и просветительскую деятельность, внося неоценимый вклад в российскую науку и подготовку высококвалифицированных специалистов в области технологии машиностроения. Круг научных интересов профессора А.П. Бабичева чрезвычайно широк: технология машиностроения и методы металлообработки [20; 24; 25; 26; 27; 29;

30]; технологическое применение низкочастотных колебаний (вибрационные технологии) [17; 21; 22; 23]; технологическое применение ударно-волновых процессов [10; 14; 16; 18; 19]; вибрационная механохимия [11; 12; 15]; экология, технология утилизации и вторичного использования отходов производства [13; 28].

За заслуги перед государством он награжден тремя правительственные медалями.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. - Доп. и перепр. изд. - Ростов н/Д: Изд-во ДГТУ, 2008.
- Бабичев, А.П. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей / А.П. Бабичев [и др.]. - Ростов н/Д: Изд-во ДГТУ, 2010.
- Бабичев, А.П. Инstrumentальное обеспечение процессов обработки деталей в гранулированных средах / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, С.А. Костенков [и др.]. - Ростов н/Д: Изд-во ДГТУ, 2011.
- Бабичев, А.П. Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, В.В. Иванов, С.Н. Худолей [и др.]. - Ростов н/Д: Изд-во ДГТУ, 2012.
- Бабичев, А.П. Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко [и др.]; науч. ред. А.В. Киречек. - Ростов н/Д: Изд-во ДГТУ, 2006.
- Устройство для отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей: пат. на изобрет. RUS 2025261 / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев, Г.А. Прокопец.
- Способ изготовления абразивного инструмента: пат. на изобрет. RUS 2155197: 04.11.99 / А.П. Бабичев, Б.В. Кравченко, Е.П. Мельникова, Е.В. Петухова.
- Способ активации смазочно-охлаждающей технологической среды: пат. на изобрет. RUS 2227156: 24.03.03 / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев, Н.Н. Должиков, Ф.Ф. Кремянский.
- Бабичев, А.П. Экспериментальные исследования виброволновых процессов в технологии утилизации сборочных единиц / А.П. Бабичев, В.Н. Веснин // Вестник Донского государственного технического университета. - 2017. - Т. 17. - № 1 (88). - С. 47-54.
- Бабичев, А.П. Формирование и адгезионная прочность механохимического твердосмазочно-го покрытия при вибрационной обработке (на примере MoS<sup>2</sup>) / А.П. Бабичев, В.С. Шоркин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2017. - Т.13. - № 1 (145). - С. 3-9.
- Иванов, В.В. Формирование химико-механических покрытий для опорных поверхностей сопрягаемых деталей / В.В. Иванов, А.П.

- Бабичев, В.П. Смоленцев, М.В. Кондратьев // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2017. - Т.13. - № 9 (153). - С. 427-430.
13. Бабичев, А.П. Технологические и организационно-экономические аспекты утилизации изделий сельхозмашиностроения / А.П. Бабичев, В.Н. Веснин, А.А. Акулова // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 104-108.
14. Бабичев, А.П. Исследование распространения ударных волн в сплошной среде металлических образцов при виброволновом нагружении / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко [и др.] // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 47-52.
15. Бабичев, А.П. Образование модифицированного слоя на стальной поверхности при вибрационной механотермической обработке / А.П. Бабичев, Ю.П. Анкудимов [и др.] // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 52-56.
16. Бабичев, А.П. Теоретическое исследование работы волновода при реализации упрочняющих технологий / А.П. Бабичев, Д.С. Дудукалова, И.М. Чукарина // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 56-63.
17. Бабичев, А.П. Повышение интенсивности съема металла при вибрационной обработке на основе использования «щелевого» эффекта в рабочей камере / А.П. Бабичев, А.М. Вобу [и др.] // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 63-69.
18. Бабичев, А.П. Экспериментальное исследование виброволновой обработки пакета образцов из разнородных материалов при различной ориентации (расположении) в пакете / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко [и др.] // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2017. – № 11 (77). – С. 30-32.
19. Бабичев, А.П. Инновационные технологии виброволновой обработки деталей машиностроения и вертолетостроения / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко [и др.] // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2017. – № 8 (74). – С. 17-23.
20. Yamouda, K. Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State / K. Yamouda, H. Bourne, M.A. Tamarkin, A.P. Babichev, D. Saidi, H.E. Amrou // Materials Science. – 2016. - Т. 52. - № 2. – С. 216-221.
21. Бабичев, А.П. Виброволновая стабилизирующая обработка деталей из алюминиевых сплавов / А.П. Бабичев, А.О. Твердуха, Ф.А. Пастухов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 3 (135). – С. 3-5.
22. Бабичев, А.П. Исследование распространения ударных волн в сплошной и слоистой среде металлических образцов при виброволновом нагружении / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-2. – С. 261-268.
23. Бабичев, А.П. Виброволновая стабилизирующая обработка слоистого пакета дисков / А.П. Бабичев, А.О. Твердуха // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2016. – № 5 (319). – С. 74-76.
24. Бабичев, А.П. Поиск новых технологических методов упрочняющей обработки коленчатых валов двигателей / А.П. Бабичев, М.Е. Попов [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – Т. 15. - № 1(80). – С. 68-78.
25. Бабичев, А.П. Вибрационные технологии в машиностроении: опыт применения и перспективы развития / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 8 (128). – С. 3-5.
26. Бабичев, А.П. Технологичность конструкции изделий машиностроения / А.П. Бабичев, В.И. Безжон [и др.]. - Ростов н/Д: Изд-во ДГТУ, 2014.
27. Бабичев, А.П. Повышение стойкости сварных соединений / А.П. Бабичев, В.И. Бутенко [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 6 (114). – С. 3-6.
28. Бабичев, А.П. Совершенствование и сравнительная оценка способов разборки прессовых соединений при ремонте и утилизации изделий машиностроения / А.П. Бабичев, Э. Дъедонне // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 1 (52). – С. 122-128.
29. Бабичев, А.П. Влияние режимов обработки и рабочей среды на радиус кромки роликовых подшипников / А.П. Бабичев, Г.К. Вейесса // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 1 (52). – С. 85-90.
30. Бабичев, А.П. Хонингование / А.П. Бабичев, Ю.Н. Полянчиков [и др.]. - Волгоград: Изд-во ВГТУ, 2013.
1. Babichev, A.P. *Fundamentals of Vibration Technology* / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – add. and republished. – Rostov-upon-Don: DSTU Publishers, 2008.
2. Babichev, A.P. *Vibration Technology Application in Parts Finish-Dressing* / A.P. Babichev [et al.]. – Rostov-upon-Don: DSTU Publishers, 2010.
3. Babichev, A.P. *Instrumental Support of Parts Processing in Granulated Media* / A.P. Babichev, P.D.

- Motrenko, S.A. Kostenkov [et al.]. – Rostov-upon-Don: DSTU Publishers, 2011.
4. Babichev, A.P. *Vibration Mechano-chemistry in Processes of Finish-Strengthening and Coatings of Parts* / A.P. Babichev, P.D. Motrenko, V.V. Ivanov, S.N. Khudoley [et al.]. – Rostov-upon-Don: DSTU Publishers, 2012.
  5. Babichev, A.P. *Vibration Technology Application for Quality Increase of Surface and Parts Operation Properties* / A.P. Babichev, P.D. Motrenko [et al.]; A.V. Kirichek, scientific adviser. – Rostov-upon-Don, DSTU Publishers, 2006.
  6. *Device for Finish-Strengthening of Parts Surfaces*: Pat. for Inv. RUS 2025261 / A.P. Babichev, I.A. Babichev, G.A. Prokopets.
  7. *Device for Parts Surfaces Strengthening*: Pat. for inv.RUS 2025269 / A.P. Babichev, I.A. Babichev, G.A. Prokopets.
  8. *Method for Abrasive Tool Manufacturing*: Pat. for invention RUS 2155197: 04.11.99 / A.P. Babichev, B.V. Kravchenko, E.P. Melnikova, E.P. Petukhova.
  9. *Method for Activation of Lubricating-Cooling Technological Environment*: Pat. for invention RUS 2227156: 24.03.03 / A.P. Babichev, I.A. Babichev, N.N. Dolzhikov, F.F. Kremyansky.
  10. Babichev, A.P. Experimental investigations of vibro-wave processes in technology of assembly unit utilization / A.P. Babichev, V.N. Vesnin // *Bulletin of Don State Technical University*. – 2017. – Vol.17. – №.1 (88). – pp. 47-54.
  11. Babichev, A.P. Formation and adhesion strength of mechano-chemical solid oil coating at vibration processing (by the example of MoS<sub>2</sub>) / A.P. Babichev, V.S. Shorkin [et al.] // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2017. – Vol.13. – №.1 (145). – pp. 3-9.
  12. Ivanov, V.V. Chemical-mechanical coating formation for support surfaces of mating parts / V.V. Ivanov, A.P. Babichev, V.P. Smolentsev, M.V. Kondratiev // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2017. – Vol. 13. – №.9 (153). – pp. 427-430.
  13. Babichev, A.P. Technological and organization-economic aspects of agricultural engineering parts utilization / A.P. Babichev, V.N Vesnin, A.A. Akulova // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technological Academy of Rybinsk*. – 2017. – №.2 (41). – pp. 104-108.
  14. Babichev, A.P. Investigations of shock wave propagation in continuum of metal samples at vibro-wave loading / A.P. Babichev, P.D. Motrenko [et al.] // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technological Academy of Rybinsk*. – 2017. – №.2 (41). – pp. 47-52.
  15. Babichev, A.P. Modified layer formation upon steel surface at vibration mechano-thermal processing / A.P. Babichev, Yu.P. Ankudimov [et al.] // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technological Academy of Rybinsk*. – 2017. – №.2 (41). – pp. 51-56.
  16. Babichev, A.P. Theoretical investigations of wave-guide operation at strengthening technologies realization / A.P. Babichev, D.S. Dudukalova, I.M. Chukarina // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technological Academy of Rybinsk*. – 2017. – №.2 (41). – pp. 56-63.
  17. Babichev, A.P. Metal removal intensity increase at vibration processing based on “slit” effect use in work chamber / A.P. Babichev, A.M. Vobu [et al.] // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technological Academy of Rybinsk*. – 2017. – №.2 (41). – pp. 63-69.
  18. Babichev, A.P. Experimental investigations of vibro-wave processing of heterogeneous samples packet at different orientation (location) in packet / A.P. Babichev, P.D. Motrenko [et al.] // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – №.11 (77). – pp. 30-32.
  19. Babichev, A.P. Innovation technologies of vibro-wave processing of engineering and helicopter production parts / A.P. Babichev, P.D. Motrenko [et al.] // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – №.8 (74). – pp. 17-23.
  20. Yamouda, K. Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State / K. Yamouda, H. Bourne, M.A. Tamarkin, A.P. Babichev, D. Saidi, H.E. Amrou // *Materials Science*. – 2016. - Vol. 52. - № 2. – pp. 216-221.
  21. Babichev, A.P. Vibro-wave stabilizing treatment of aluminum alloy parts / A.P. Babichev, A.O. Tverdukh, F.A. Pastukhov // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2016. – №.3 (135). – pp. 3-5.
  22. Babichev, A.P. Investigations of shock wave propagation in continuum and layered environment of metal samples at vibro-wave loading / A.P. Babichev, P.D. Motrenko [et al.] // *Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2016. – №.8-2. – pp. 261-268.
  23. Babichev, A.P. Vibro-wave stabilizing processing of disk layered packet / A.P. Babichev, A.O. Tverdukh // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2016. – №.5 (319). – pp. 74-76.
  24. Babichev, A.P. Search of new technological methods of engine crankshaft strengthening work / A.P. Babichev, M.E. Popov [et al.] // *Bulletin of Don State Technical University*. – 2015. – Vol.15. – №.1 (80). – pp. 68-78.
  25. Babichev, A.P. Vibration technologies in mechanical engineering: experience of application and development outlooks / A.P. Babichev, P.D. Motrenko // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2015. – №.8 (128). – pp. 3-5.
  26. Babichev, A.P. *Manufacturability of Engineering Product Design* / A.P. Babichev, V.I. Bezzhon [et al.]. – Rostov-upon-Don: DSTU Publishers, 2014.
  27. Babichev, A.P. Weld joint strength increase / A.P. Babichev, V.I. Butenko [et al.] // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2014. – №.6 (114). – pp. 3-6.
  28. Babichev, A.P. Improvement and comparative estimate of press-fit connection dismantling methods at repair and utilization of engineering products/ A.P. Babichev, E. Diedonne // *Proceedings of*

- South-Western State University.* – 2014. – No.1 (52). – pp. 122-128.
29. Babichev, A.P. Working modes and operation environment impact upon radius of roller bearing edge / A.P. Babichev, G.K. Weiss // *Proceedings of South-Western State University.* – 2014. – No.1 (52). – pp. 85-90.
30. Babichev, A.P. *Honing* / A.P. Babichev, Yu.N. Polyanchikov [et al.]. – Volgograd: VSTU Publishers, 2013.

*Статья поступила в редакцию 8.02.18.*

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

**Сведения об авторах:**

**Киричек Андрей Викторович**, д.т.н., профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, e-mail: [avk.57@yandex.ru](mailto:avk.57@yandex.ru).

**Лебедев Валерий Александрович**, д.т.н., профессор Донского государственного технического университета, e-mail: [va.lebidev@yandex.ru](mailto:va.lebidev@yandex.ru).

**Kirichek Andrey Victorovich**, D. Eng., Prof. Pro-Rector for Promising Development of Bryansk State Technical University, e-mail: [avk.57@yandex.ru](mailto:avk.57@yandex.ru).

**Lebedev Valery Alexandrovich**, D. Eng., Prof. of Don State Technical University, e-mail: [va.lebidev@yandex.ru](mailto:va.lebidev@yandex.ru).

**Морозова Анна Валентиновна**, к.социол.н., начальник Управления инновационной деятельности Брянского государственного технического университета, e-mail: [niotostu@gmail.com](mailto:niotostu@gmail.com).

**Тарасов Дмитрий Евгеньевич**, к.т.н., гл. конструктор проекта АО «ГМС Ливгидромаш», e-mail: [tde@hms-livgidromash.ru](mailto:tde@hms-livgidromash.ru).

**Morozova Anna Valentinovna**, Can. Soc., Head of Innovation Activity Department of Bryansk State Technical University, e-mail: [niotostu@gmail.com](mailto:niotostu@gmail.com).

**Tarasov Dmitry Yevgenievich**, Can. Eng., Chief Designer of Project SC “GMS Livhydromach”, e-mail: [tde@hms-livgidromash.ru](mailto:tde@hms-livgidromash.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 высыпается копия рецензии. Рецензии на статьи хранятся в редакции не более 3 лет.

6. Файлы,ываемые в редакцию, должны быть названы по фамилии первого автора (например: Ivanov\_I.I.).

7. Объём 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., заголовок – 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 развивающего 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 несет 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 "БУРЕВЕСТИК" (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 финансирования 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)**



**ВЕСТИК  
БРЯНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Литературный редактор М.Л. Щербакова  
Корректоры В.А. Ерохина, М.Л. Щербакова  
Компьютерная верстка В.А. Ерохина

---

Подписано в печать 19.02.18. Дата выхода в свет 25.02.18. Формат 60x84<sup>1/8</sup>.  
Бумага офсетная. Офсетная печать. Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 11,16.  
Тираж 500 экз. Свободная цена. Заказ 6

---

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