



# ВЕСТНИК

2020

№ 1 (84)

САРАТОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-технический журнал



# ВЕСТНИК

**САРАТОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**2020**

**№ 1 (84)**

**Научно-технический журнал**

Издается с 2003 г.

**Выходит один раз в квартал**

Март 2020 года

**Главный редактор**

д.т.н., профессор А.А. Игнатьев

**Заместитель главного редактора**

д.т.н., профессор Ю.Б. Томашевский

**Ответственный секретарь**

к.т.н., доцент В.О. Горбачев

**Редакционная коллегия:**

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

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

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

Д.т.н., проф. А.Е. Зверовицков (ПГУ)

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

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

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

Д.т.н., проф. В.А. Кушников (СНЦ РАН)

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

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

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

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

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

(СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

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

Д.т.н., проф. А. Аман (Германия)

Д.т.н., проф. З. Крехел (Словакия)

Д.т.н., проф. В. Хардт (Германия)

Редактор Л.А. Скворцова

Компьютерная верстка Т.В. Семеновой

Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:

Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77

Телефон: 8 (845-2) 99-89-81

E-mail: vestnik@sstu.ru

Подписано в печать 27.03.2020 Дата выхода в свет 30.03.2020

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 12,0 Уч.-изд. л. 5,0

Тираж 500 экз. Заказ 38

Отпечатано в Издательстве СГТУ,

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Полная электронная версия журнала

размещена в системе РИНЦ

в открытом доступе на платформе

eLIBRARY.RU

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

**Подписной индекс 18378** (каталог Газеты. Журналы на 2-е полугодие 2020 г.)

© Саратовский государственный  
ISSN 1999-8341 технический университет, 2020

# VESTNIK

**SARATOV  
STATE  
TECHNICAL  
UNIVERSITY**

**2020**

**№ 1 (84)**

**Scientific Journal**

Since 2003

**Published quarterly**

March 2020

**Editor-in-chief**

Professor A.A. Ignatiev

**Editor-in-chief assistant**

Professor Yu.B. Tovashevsky

**Executive secretary**

Associate Professor V.O. Gorbachev

**Editorial board:**

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

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

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

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

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

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

Ph. D., Professor A.V. Korolev (SSTU)

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

Ph. D., Professor T.G. Nasad (SSTU)

Corresponding member of RAS, Dr. Sc., Professor

A.F. Rezhnikov (ISP RAS)

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

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

Corresponding member of RAE, Dr. Sc., Professor

A.A. Sytnik (SSTU)

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

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

Doctor of Sciences, Professor Z. Krehel (Slovakia)

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

Editor L.A. Skvortsova

Computer-based page-proof T.V. Semenova

Rendering A.H. Askarova

---

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street  
Saratov, 410054 Russia

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

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

---

Print date: 27.03.2020. Date of publication 30.03.2020

Format 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 12,0

Publication base sheet 5,0

Circulation: 500 printed copies

Order 38

Publisher and Editorial Address:

77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

---

eLIBRARY.ru

Subscription index **18378**

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

<b>Безруков А.И., Гулевич Н.А., Пчелинцева Е.Г.</b> СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ.....	6
<b>Игнатьев А.А., Добряков В.А., Игнатьев С.А.</b> АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ .....	14
<b>Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б., Васильев Д.А., Петров Д.Ю.</b> МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ВЫБОРА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАФЕДРОЙ .....	26

### **МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

<b>Королев А.В., Королев А.А.</b> ИННОВАЦИОННЫЕ МИКРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	34
<b>Насад Т.Г., Шеров К.Т., Насад И.П.</b> ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ .....	47
<b>Панфилова А.В.</b> ЭВОЛЮЦИЯ РАЗРАБОТКИ СПОСОБА УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ .....	52
<b>Трошин А.А., Захаров О.В.</b> МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ.....	59

### **МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

<b>Королев А.В.</b> ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	68
<b>Проскураков В.И., Дуланов Н.А., Бородина С.А.</b> УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т ЛАЗЕРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ ПОРОШКОМ СИЛИЦИДА МОЛИБДЕНА .....	77
<b>Проскураков В.И., Ширин С.С., Бородина С.А., Темралиева А.Г.</b> ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т ПОРОШКОМ ДИОКСИДА ТИТАНА .....	81
<b>Фомин А.А., Федосеев М.Е., Палканов П.А., Аман А., Кошуро В.А., Шумилин А.И.</b> ИНДУКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЬНЫХ ПУАНСОНОВ С МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ И ДИАГРАММЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ СТАЛИ 45 .....	87

## CONTENTS

### COMPUTER SCIENCE, ENGINEERING AND MANAGEMENT

---

<b>Bezrukov A.I., Gulevich N.A., Pchelintseva E.G.</b> STATISTICAL ANALYSIS FOR COMPUTER-BASED ASSESSMENT .....	6
<b>Ignatiev A.A., Dobryakov V.A., Ignatiev S.A.</b> AUTOMATED QUALITY CONTROL IN THE BEARING PARTS MANUFACTURE .....	14
<b>Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Tomashevsky Yu.B., Vasiliev D.A., Petrov D.Yu.</b> MULTI-CRITERIA SELECTION PROBLEMS IN THE SYSTEM DEPARTMENT MANAGEMENT .....	26

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

---

<b>Korolev A.V., Korolev A.A.</b> INNOVATIONS IN MICRO-POWER TECHNOLOGIES FOR MECHANICAL ENGINEERING INDUSTRIES .....	34
<b>Nasad T.G., Sher K.T., Nasad I.P.</b> THERMOPHYSICAL ASPECTS OF HYBRID TECHNOLOGIES .....	47
<b>Panfilova A.V.</b> EVOLUTION OF DESCALING METHODOLOGY .....	52
<b>Troshin A.A., Zakharov O.V.</b> FILTRATION METHODOLOGY FOR MEASURING OPERATIONS USING COORDINATE MEASURING MACHINES .....	59

### METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

---

<b>Kuznetsov V.A., Korolev A.V.</b> THERMODYNAMIC METHODS FOR RESEARCHING THERMOELASTIC DEFORMATION .....	68
<b>Proskuryakov V.I., Bulanov N.A., Borodina S.A.</b> HARDENING THE 12X18H10T CHROME-NICKEL STEEL SURFACE USING MOLYBDENUM SILICIDE POWDER FOR LASER DOPING .....	77
<b>Proskuryakov V.I., Shirin S.S., Borodina S.A., Temralieva A.G.</b> LASER SURFACE MODIFICATION OF THE STAINLESS 12X18H10T STEEL USING TITANIUM DIOXIDE POWDER .....	81
<b>Fomin A.A., Fedoseev M.E., Polkanov P.A., Aman A., Koshuro V.A., Shumilin A.I.</b> INDUCTION-HEAT TREATMENT OF STEEL PUNCHES WITH CERAMIC METAL COATING AND STRESS-STRAIN DIAGRAMS FOR 45# STEEL .....	87



В юбилейный год 90-летия Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. мы возобновляем издание научно-технического журнала «Вестник СГТУ». Задачи возрождаемого издания – развить, поддержать и систематизировать лучшие достижения ученых Саратовского государственного технического университета имени Гагари-

на Ю.А. Наша миссия как крупнейшего регионального центра подготовки кадров – способствовать всестороннему развитию промышленного сектора и цифровой экономики. Акцент публикаций планируется сделать на выполнении исследований и разработок для высокотехнологичных отраслей региона.

Основные принципы работы журнала:

- Журнал публикует материалы, освещающие современные проблемы науки и техники, способствует их широкому распространению и развитию данной области знания в целом.
- Журнал стремится обеспечить бóльшую интеграцию отечественных ученых в мировое профессиональное сообщество.
- Журнал призван обеспечить тесное взаимодействие научных и практикующих исследователей, способствует внедрению новых научных и прикладных разработок в производство.

В журнале «Вестник СГТУ» планируется освещать такие научные направления, как «Информатика, вычислительная техника и управление», «Машиностроение и машиноведение», «Металлургия и материаловедение»

Приглашаем всех принять участие в этом научном проекте в качестве как авторов различных материалов, так и рецензентов.

Журнал «Вестник СГТУ» имеет большой потенциал и все основания в будущем войти в Перечень ВАК Минобрнауки России и реферативную базу данных Scopus.

Ректор

О.А. Афонин

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

УДК 004.942, 378.146

**А.И. Безруков, Н.А. Гулевич, Е.Г. Пчелинцева**

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ

*Аннотация.* В статье обсуждаются цели, задачи и методы статистического анализа результатов компьютерного тестирования. Предлагается использовать методы статистического анализа для некорректных заданий; оценки фактической трудности тестовых заданий; выявления случаев «взлома» банков тестовых заданий. На основании численных экспериментов с имитационной моделью тестирования проводится сравнение достоверности и точности различных методов обработки результатов тестирования. Предлагаются методы, повышающие точность и достоверность результатов тестирования. Делается вывод о необходимости применения статистического анализа при ведении банков тестовых заданий.

*Ключевые слова:* компьютерное тестирование, теория педагогических измерений, точность и достоверность результатов тестирования, модель Рашиа, модель Бирнбаума, имитационное моделирование, ведение банков тестовых заданий

**A. Bezrukov, N. Gulevich, E. Pchelintseva**

## STATISTICAL ANALYSIS FOR COMPUTER-BASED ASSESSMENT

*Abstract.* The article discusses the aims, objectives and methodology of statistical analysis applied to computer-administered test results. The statistical analysis methodology is proposed for the cases with ill-posed problems, assessment of difficulties relating the test tasks, and hacking the test assignment databases. The methods for processing the test results are compared in terms of their reliability and accuracy. The comparison is performed using numerical experiments for simulation the test models. The proposed methodology is aimed to upgrade the test accuracy and reliability. The statistical analysis is assumed as an effective means in monitoring the test task databases.

*Keywords:* computer-based testing, pedagogical measurements theory, accuracy and reliability of test results, the Rasch model, the Birnbaum model, simulation, monitoring the databases of test tasks

### ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное тестирование является одним из самых популярных методов проверки знаний студентов. В качестве преимуществ компьютерного тестирования обычно называют: объективность оценки, оперативность и относительно низкую трудоемкость проведения контроля. Однако, и у преподавателей и у студентов имеется ряд претензий к этому эффективному методу. Большинство претензий преподавателей сводится к неприятию самого прин-

ципа тестирования – выбору правильного ответа из нескольких предложенных. Проверяется не умение думать, а умение угадывать правильный ответ. Претензия обоснованная, но из этого нужно сделать вывод, что при контроле знаний нельзя ограничиться только тестированием. Решение кейсов, публичная защита курсовых работ, выступления на семинарах и т.д. вместе с компьютерным тестированием вполне обеспечивают объективность оценки компетенций студентов.

Студенты часто сравнивают тестирование с лотереей: знающий студент может не пройти тест, а удачливый бездельник легко угадывает правильные ответы. Это более серьезное обвинение. Компьютерный тест, как и любое измерение, является случайным процессом. И как при любом измерении, мы должны оценивать погрешность (доверительный интервал) и достоверность (доверительную вероятность) результатов тестирования и применять методы, оптимизирующие эти характеристики.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее признанной теорией, рассматривающей тестирование, как случайный процесс, является теория педагогических измерений (Item response theory, IRT) [1 – 3]. Согласно этой теории, тестирование – статистический метод оценки латентной характеристики студента  $\theta$  (уровня его подготовленности) по результатам выполнения этим студентом нескольких заданий, каждое из которых имеет определенный уровень трудности  $\delta_i$ .

Статистически характеристику  $\theta$  можно интерпретировать как логарифм отношения шансов пройти или не пройти тест. В статистике единица измерения такой величины называется логит. Обозначим  $P$  – вероятность того, что студент успешно пройдет тест. Тогда:

$$\theta = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) \text{ логит} \quad (1)$$

Трудность задания  $\delta_i$  будем интерпретировать, как логарифм отношения шансов не справиться и справиться с этим заданием. Пусть  $Q_i$  – вероятность того, что студент не справится с заданием  $i$ . Тогда:

$$\delta_i = \ln\left(\frac{Q_i}{1-Q_i}\right) \text{ логит} \quad (2)$$

Отметим, что обе характеристики выражены в одинаковых единицах измерения. Нетрудно показать, что дисперсия логарифма отношения шансов близка к единице.

В IRT предполагается, что вероятность того, что студент с уровнем подготовки  $\theta$  успешно справится с заданием трудности  $\delta_i$  зависит от разности этих характеристик. Раш предложил следующую формулу для оценки этой вероятности [4-5]:

$$P(\theta, \delta_i) = \frac{e^{\alpha(\theta-\delta_i)}}{1+e^{\alpha(\theta-\delta_i)}} \quad (3)$$

где  $\alpha$  – чувствительность задания.

При  $\alpha \approx 1,71$  распределение Раша практически совпадает с нормальным распределением с единичной дисперсией, поэтому, в дальнейшем мы будем использовать это значение для  $\alpha$ .

В модели Раша вероятность успеха зависит только от сложности вопроса и подготовленности испытуемого. Однако в реальном тесте существует вероятность угадывания правильного ответа без выполнения задания. Например, если в задании предлагается выбрать один из четырех ответов, такая вероятность равна 25%. Чтобы учесть эту вероятность, Бирнбаум [6] предложил уточнить модель Раша:

$$P(\theta, \delta_i) = c_i + (1 - c_i) \cdot \frac{e^{\alpha(\theta-\delta_i)}}{1+e^{\alpha(\theta-\delta_i)}} \quad (4)$$

где  $c_i$  – вероятность угадывания без выполнения тестового задания  $i$ .



Модель Раша-Бирнбаума позволяет применять хорошо разработанные статистические методы для оценки  $\theta$  и  $\delta_i$ ; правильно конструировать тесты; отслеживать и корректировать наполнение банков тестовых заданий.

Как бы ни хороша была теория, как бы не были убедительны ее положения, окончательный вердикт об адекватности теории можно вынести только после применения ее положений к реальным данным. Система адаптивного тестирования (АСТ) [7] накапливает результаты тестирования в своей базе данных. До недавнего времени эта база не была защищена паролем, поэтому накопленные в ней данные можно использовать для статистического анализа результатов тестирования.

Для проверки положений теории на реальных данных о результатах тестирования была применена следующая методика [8].

1. Выбирается тестовое задание для исследования.
2. Из базы данных АСТ выбираются результаты тестирования, студентов, выполнявших это задание. Предполагается, что записанный в БД результат прохождения теста является объективной оценкой  $\theta$  уровня подготовленности каждого студента.
3. Результаты группируются по  $\theta$ . В каждой группе рассчитывается частота успешного выполнения исследуемого задания.
4. Строится график зависимости частоты успешных ответов от уровня подготовленности студентов (рис. 1).

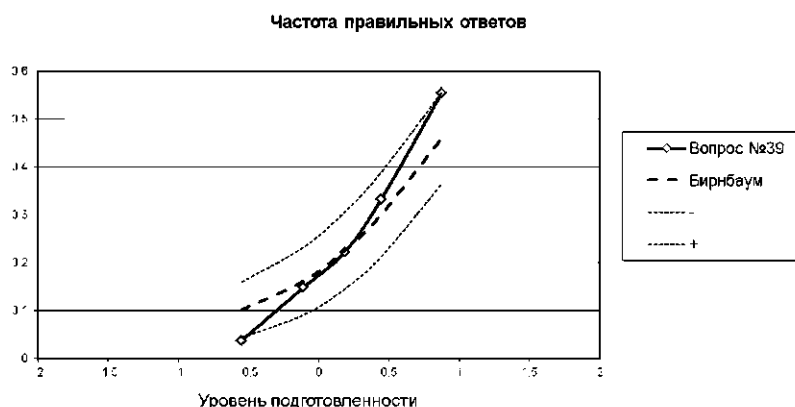


Рис. 1. Зависимость частоты правильных ответов от уровня подготовленности студентов для корректного задания

В тех же координатах строится кривая, соответствующая модели Раша-Бирнбаума ( $B(\theta_i, \delta)$ ). Чтобы оценить масштаб отклонения фактических результатов от теоретической кривой, в каждой группе рассчитывается стандартное отклонение (разброс) результатов  $\sigma_i$ .

$$\sigma_i = \sqrt{n_i \cdot p_i \cdot (1 - p_i)} \quad (5)$$

где:  $n_i$  – число студентов в группе  $i$ ;

$p_i$  – частота правильных ответов в группе  $i$ .

Интервал  $B(\theta_i, \delta) \pm \sigma_i$  (помечен пунктирными линиями) является двух-сигмовым доверительным интервалом нашей оценки. Для построения подобных графиков была разработана программа для ЭВМ ASTRA [9].

Анализ зависимостей показал, что в подавляющем большинстве случаев фактическое распределение частоты правильных ответов соответствует распределению Раша-Бирнбаума. Однако для небольшого количества заданий эта зависимость существенно отличалась от теоретической. Содержательный анализ таких заданий показал, что их формулировки некорректны.



Рис. 2. Зависимость частоты правильных ответов от уровня подготовленности студентов для некорректного задания

Таким образом, описываемый метод может быть использован для выявления некорректных заданий. С этой целью для всех ранее используемых заданий, хранящихся в банке тестовых заданий, строятся графики зависимости частоты правильных ответов от  $\theta$ . Задания, графики которых существенно выходят за доверительный интервал (например, рис. 2), подвергаются содержательному анализу, исправляются или, если это не возможно, удаляются из банка. Регулярное применение описанного метода позволит своевременно выявлять некорректные задания и повышать качество банка тестовых заданий в процессе его использования.

Следующая проблема – объективная оценка трудности тестовых заданий. Разрабатывая тест, преподаватель задает трудности заданий из своих представлений. Однако для студентов представление о трудности задания могут существенно отличаться. Это может быть вызвано недостаточно глубоким усвоением материала, отличием стиля и терминологии в формулировке задания от привычного студентам, а также многими другими факторами. Вместе с тем, трудность заданий учитывается при оценке подготовленности студентов. Следовательно, некорректное назначение трудности снижает достоверность результатов тестирования.

Модель Раша-Бирнбаума позволяет объективно оценить трудности заданий по результатам тестирования. С точки зрения статистики, формула (4) задает параметрическое распределение успешности выполнения заданий. Если параметр  $\theta$  известен (например, принимается равным оценке уровня подготовленности студента, полученной в результате тестирования), то второй параметр  $\delta_i$  может быть оценен статистическими методами (например, методом максимального правдоподобия) из статистики многократного использования данного задания.

Согласно теории педагогических измерений, наиболее надежной оценка уровня подготовленности  $\theta$  будет при условии, что задания в тесте равнодистантны по трудности. Однако если фактическая трудность заданий не контролируется, распределение заданий в банке будет близко к нормальному. На рис. 3 приведено распределение заданий по фактической трудности, рассчитанной методом максимального правдоподобия.

Дефицит заданий низкой и высокой трудности снижает достоверность оценок соответственно слабых и сильных студентов (тест хорошо оценивает только студентов среднего уровня). Постоянный контроль распределения заданий по трудности и целенаправленное пополнение банков тестовых заданий заданиями дефицитной трудности повысит достоверность и точность результатов тестирования. Отметим, что существенное отклонение уровня трудности, задаваемого преподавателем от фактической трудности заданий должно насторожить авторов теста и заставить их разобраться в причинах такого несоответствия.

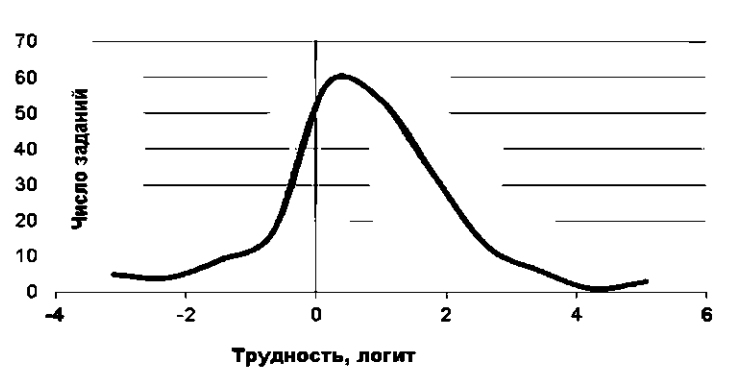


Рис. 3. Распределение заданий по фактической трудности

Результаты компьютерного тестирования используются для принятия важных решений об успеваемости студентов, целесообразности продолжения обучения, формировании групп наиболее способных студентов и т.д. Чтобы осознано пользоваться тестами мы должны знать их метрологические характеристики. Теоретической основой оценок точности и достоверности результатов тестирования является модель Раша-Бирнбаума. Однако, несмотря на достаточно простой вид, исследовать эту модель аналитически достаточно трудно. Например, согласно этой модели количества правильных  $N_s$  и ошибочных ответов  $N_n$ , полученных студентом при тестировании, имеют биномиальное распределение Пуассона. Если мы хотим подсчитать вероятность того, что в тесте, состоящем из  $n$  заданий студент справился с  $k$  заданиями, нам придется подсчитывать выражение, состоящее из  $\frac{n!}{(n-k)! \cdot k!}$  элементов. При  $n = 30$  это число составляет порядка  $10^{20}$  элементов. Существуют достаточно изощренные методы вычисления подобных сумм, использующие, например, дискретное преобразование Фурье и выражающие результат в виде комплексного числа с малой мнимой частью [11], но для практического применения такой подход вряд ли можно считать полезным.

Для получения практических результатов нами была построена имитационная модель компьютерного тестирования [12]. Транзактами модели являются виртуальные студенты, проходящие тестирование. Для каждого «студента» указывается уровень его подготовленности. Тест моделируется набором тестовых заданий, для каждого из которых задается уровень трудности. Процесс тестирования моделируется с использованием распределения Раша-Бирнбаума: вероятность выполнения задания рассчитывается по формуле (4).

Имитационная модель позволяет сопоставить различные методы обработки результатов тестирования и оценить зависимости качества тестирования от характеристик тестовых заданий. Назовем ошибкой тестирования разницу между «истинным» (заданным в модели значением  $\theta$  и оценкой этой величины по результатам тестирования. На рис. 4 приведены зависимости ошибки тестирования двух различных методов от вероятности угадывания.

Как видно из графика, метод максимального правдоподобия гораздо более устойчив к возрастанию вероятности угадывания. Проведенные нами численные эксперименты показывают неоспоримые преимущества этого метода перед другими методами обработки результатов тестирования.

Отказ от априорного задания трудностей тестовых заданий в пользу статистической оценки их значений порождает проблему: Мы оцениваем уровни подготовленности  $\theta$ , используя априорные трудности заданий, а потом пересчитываем эти трудности с использованием найденных  $\theta$ . Если мы проведем расчет снова, то получим уже другие значения  $\theta$ .

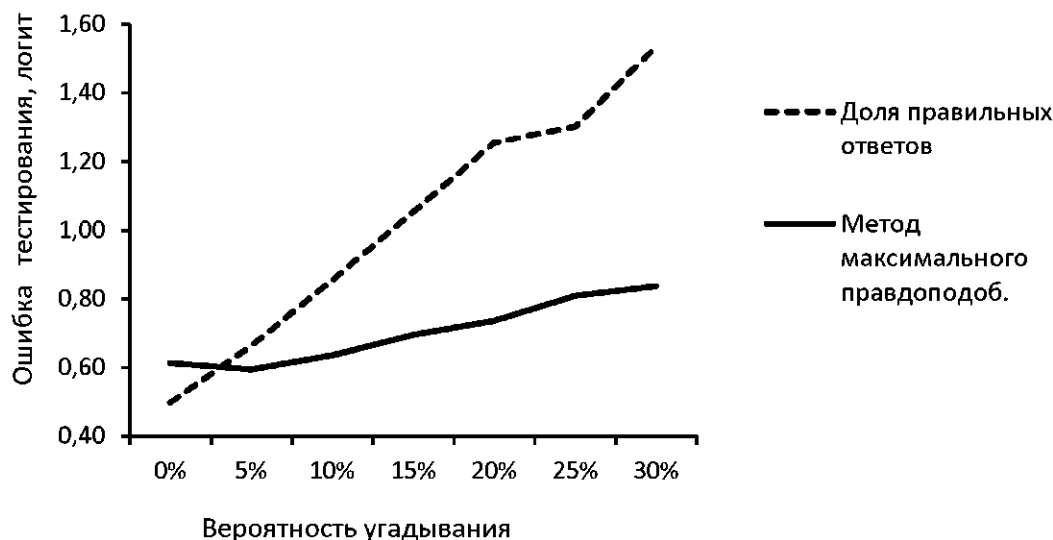


Рис. 4. Зависимости ошибки тестирования от вероятности угадывания

А.Ю. Митрофанов<sup>1</sup> предложил использовать итерационный алгоритм пересчета  $\theta$  и  $\delta_i$  и предсказал сходимость этой процедуры. Проведенные нами численные эксперименты показали, что итерации достаточно быстро (за 2-3 шага) сходятся, сокращая ошибку на 7-10%. Дальнейшие итерации практически не меняют результат.

Одно из распространенных возражений по применению компьютерного тестирования звучит так: «Тестовые задания достаточно быстро «взламываются». Студенты узнают номера ответов, которые в тесте считаются правильными и успешно проходят тестирование вне зависимости от их уровня подготовленности». Чтобы проверить соответствует ли это нарекание действительности, нами был проведен статистический анализ результатов тестирования, накопленных в системе адаптивного тестирования АСТ в Саратовском социально-экономическом институте на апрель 2010 г.

Анализ зависимостей частоты удачных ответов от времени показал, что при нечастом применении задания успешность его выполнения является случайной величиной, практически не зависящей от времени.

Однако, при достаточно длительном применении (например, в тестах ФЭПО) может наблюдаться «взлом» задания. На графике это может проявляться как резкое увеличение числа удачных ответов. На рис. 5 представлен график зависимости частоты выполнения задания от продолжительности его использования при тестировании. Несколько первых использований задания дали частоту выполнения  $\sim 85\%$ . Однако, после 18.12.08 в трех применениях задание выполнялось с частотой 100%. Это, скорее всего, свидетельствует о взломе задания.

Для выявления взлома можно применить инструмент проверки статистических гипотез. Для каждого нового применения задания уточняется значение параметра  $c$ . Оценивается дисперсия такой оценки и строится доверительный интервал для следующей оценки. Если следующая оценка статистически значимо выше накопленной<sup>2</sup>, это может свидетельствовать о взломе задания. Такое задание лучше некоторое время не использовать («поместить в карантин»).

<sup>1</sup> Доцент Саратовского социально-экономического института.

<sup>2</sup> Термин «статистически значимо» подразумевает, что заданы доверительная вероятность  $P$  и величина доверительного интервала  $(X_0, X_1)$ . Т.Е. с вероятностью  $P$  оценка  $c$  должна быть меньше  $X_1$ . Если следующая оценка  $c$  правее границы доверительного интервала, это значит, что с вероятностью  $P$  произошел взлом.

Зависимость ответов от времени  
(БТЗ=Информатика ФЭПО Вопрос №44)

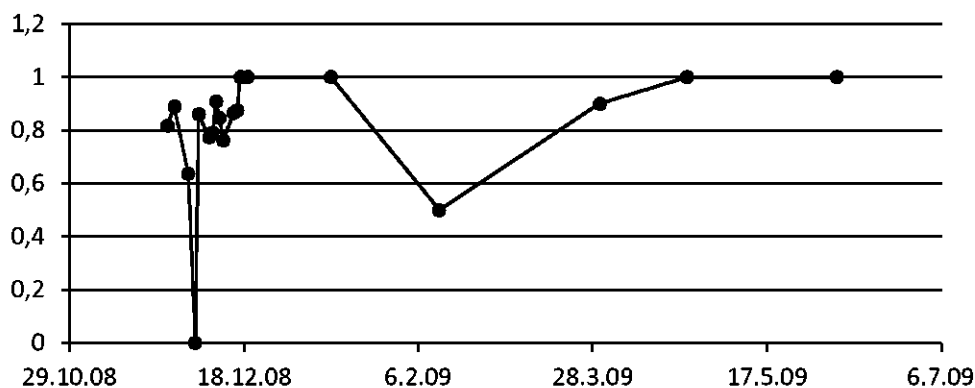


Рис. 5. Зависимость частоты выполнения задания от времени его использования

## ВЫВОДЫ

Рассмотренные в статье методы статистического анализа результатов тестирования позволяют решить ряд практических задач компьютерного тестирования, оценить метрологические характеристики этого инструмента оценки знаний обучающихся. Комплексное применение предложенных методов в системах компьютерного тестирования позволит повысить достоверность и точность оценок уровня подготовленности студентов.

На основании результатов, изложенных в статье можно сформулировать несколько практических рекомендаций:

1. Методы статистического анализа должны стать обязательной частью функциональности современных систем компьютерного тестирования.
2. Следует вести банки данных тестовых заданий, своевременно выявлять некорректные тесты, выявлять и бороться с угрозой «взлома», а также пополнять банки тестами требуемой трудности.
3. Так как метод максимального правдоподобия по большинству характеристик превосходит остальные методы подведения итогов тестирования, он должен стать основным методом в системах компьютерного тестирования.
4. При конструировании тестов для определенной цели, учитывающих существующие характеристики банка тестовых заданий и контингента тестируемых студентов следует использовать имитационную модель тестирования, позволяющую подобрать оптимальные характеристики теста.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аванесов В. Item response theory: Основные понятия и положения. [Электронный ресурс] / В. Аванесов – Режим доступа: <http://testolog.narod.ru/Theory59.html>.
2. Аванесов В.С. Применение тестовых форм в Rasch Measurement [Текст] / В.С. Аванесов // Педагогические измерения, 2005, №4. – С. 3-20.
3. Михеев О.В. Математические модели педагогических измерений [Текст] / О.В. Михеев // Педагогические измерения, 2004, №2. – С. 75-88.
4. Rasch Probabilistic models for some intelligence and attainment tests. – Chicago, IL, USA: University of Chicago Press, 1980. 224 p.
5. Lord F.M. (1980). Applications of item response theory to practical testing problems. Mahwah, NJ: Erlbaum.

6. Birnbaum A. Some Latent Trait Models and Their Use in Inferring and Examinee's Ability. In Lord F.M., Novick M. Statistical Theories of Mental Test Scores. Addison-Wesley Publ. Co. Reading, Mass, 1968. – P. 397-479.

7. Система компьютерного адаптивного тестирования АСТ-ТЕСТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: / [http://www.ast-centre.ru/testirovanie/ast\\_test/](http://www.ast-centre.ru/testirovanie/ast_test/)

8. Безруков А.И. Алгоритм визуализации статистики результатов выполнения тестовых заданий, накопленных в системе АСТ [Текст] / А.И. Безруков, Г.Г. Погожилская // Известия Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова. 2015. № 4 (22). С. 178-188.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016615495 «Программа анализа качества банков тестовых заданий на основе модели Раша-Бирнбаума. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 25.05.2016.

10. Википедия на английском языке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson\\_binomial\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson_binomial_distribution)

11. Fernandez M; S. Williams (2010). «Closed-Form Expression for the Poisson-Binomial Probability Density Function». IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems. 46(2): 803–817. doi:10.1109/TAES.2010.5461658.

12. Безруков А.И. Имитационная модель для оценки достоверности и точности результатов тестирования [Текст] / А.И. Безруков, С.А. Акимова, Г.Г. Погожилская // Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях по физике и педагогике: сб. – Саратов, 2017. С. 8-15.

13. Чельшкова М.Б. Теория и практика конструирования педагогических тестов. [Текст] / М.Б. Чельшкова. – М., 2002 г.;

14. Использование модели гамма-распределения в задаче формирования ограниченного по времени тестов в системе дистанционного обучения / А.В. Босов, Г.А. Мхитарян, А.В. Наумов, А.П. Сапунова // Информатика и ее применение, 2019. т. 13. Вып. 4. с 11-17.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Безруков Алексей Иосифович** – кандидат социологических наук, доцент кафедры «Информационно-коммуникационные системы и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Гулевич Наталья Анатольевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-коммуникационные системы и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Пчелинцева Елена Германовна** – кандидат социологических наук, доцент кафедры «Информационно-коммуникационные системы и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Alexander A. Bezrukov** – PhD (Economics), Associate Professor Department of Information and Communication Systems and Software Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Natalia A. Gulevich** – PhD (Technical Science), Associate Professor Department of Information and Communication Systems and Software Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Elena G. Pchelintseva** – PhD (Sociology), Associate Professor Department of Information and Communication Systems and Software Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.02.20, принята к опубликованию 15.03.20*

**А.А. Игнатьев, В.А. Добряков, С.А. Игнатьев**

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ**

*Аннотация.* Рассматриваются вопросы автоматизированного контроля параметров качества деталей вихрековым методом, виброакустического контроля динамического качества станков и активного контроля снимаемого припуска при шлифовальной обработке колец подшипников.

*Ключевые слова:* шлифовальная обработка, кольца подшипников, качество обработки, автоматизированный контроль

**A.A. Ignatiev, V.A. Dobryakov, S.A. Ignatiev**

## **AUTOMATED QUALITY CONTROL IN THE BEARING PARTS MANUFACTURE**

*Abstract.* The article deals with the problems of automated quality characteristics control of the item parts using the eddy current method, the vibro-acoustic dynamic quality control of machines, and the in-process control of grinding allowance for the bearing rings.

*Keywords:* grinding, bearing rings, surface finish, automated control

### **ВВЕДЕНИЕ**

В большинстве промышленно развитых стран во многих фирмах функционируют системы управления качеством продукции (УКП), которые способствуют её высокому качеству и обеспечивают её конкурентоспособность на международном рынке. В силу особенностей производства ряда сложных наукоемких изделий всегда наблюдаются вариации качества продукции, поэтому решение проблемы обеспечения качества базируется на применении научных, в том числе системных и статистических методов управления качеством, а также и на продолжительной системе подготовки квалифицированного управленческого и технического персонала. Научно обоснованная организация контроля качества изделий позволяет приблизить долю дефектных единиц продукции к нулю, тогда из этого следует, что необходимо постоянное совершенствование методов и средства контроля качества, в том числе с использованием возможностей микропроцессорной техники и информационных технологий. Контроль качества осуществляется путем сравнения запланированных значений показателей качества с их действительными значениями, анализа состояния технологического процесса (ТП) и оборудования, а затем принимаются меры по управлению качеством продукции. В целом для предприятия наиболее часто реализуется непрерывный PDCA-цикл, в соответствии с которым осуществляется управление качеством [1].

Для подшипниковой промышленности характерна высокая конкуренция на рынке сбыта продукции, в том числе для авиационной и автомобильной техники, других транспортных средств, а также для приборостроения и военной техники различного назначения. Для повышения конкурентоспособности необходимо обеспечить высокое качество подшипников, что достигается внедрением системы мониторинга технологического процесса (СМП) как элемента системы управления качеством продукции [2, 3]. Качество функцио-

нирования СМТП в значительной степени зависит от ее организации в рамках предприятия. Для построения эффективной СМТП необходима методология, позволяющая на основе системных представлений рекомендовать целесообразную организацию системы и принципы ее функционирования, а также разработать научное обоснование и комплекс технических решений. Системный подход позволяет при создании СМТП рационально сформулировать и решить ряд взаимосвязанных задач, в том числе и задачу организации структуры системы в виде четырех подсистем: организационной, технического обеспечения, научно-методической и информационной [2, 4].

Для эффективной реализации СМТП необходимы большой объем достоверной измерительной информации о состоянии ТП и использование современных информационных технологий для ее обработки и представления в удобной для анализа и принятия решения форме. Источниками информации о состоянии ТП служат встроенные и внешние средства контроля станков, режимов обработки и деталей, которые позволяют осуществлять измерение определяющих параметров в ручном, автоматизированном или автоматическом режиме [5]. При реализации СМТП основная роль отводится автоматизированным средствам контроля, имеющим высокую производительность, а также снижающим влияние человеческого фактора на результаты измерений.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА

Рост требований к качеству продукции подшипниковой промышленности обуславливает необходимость повышения качества ТП, и, соответственно, качества функционирования станков, которые должны иметь высокую технологическую надежность [6, 7]. Полный ТП при производстве подшипников включает, например, литье заготовок, токарную, шлифовальную, суперфинишную обработку и ряд других. В соответствии с известными системами У КП все компоненты ТП требуют контроля (непрерывного или дискретного), и соответственно, принятия решения по результатам контроля.

Эксплуатационная надежность подшипников и затраты на их изготовление в значительной степени определяются шлифовальной обработкой колец подшипников, в ходе которой в основном формируются точность размеров и качество поверхностного слоя дорожек качения. Шлифование, особенно высокопроизводительное, сопровождается интенсивными силовыми и тепловыми процессами в зоне резания, поэтому непостоянство условий обработки приводит к существенным отклонениям значений параметров точности дорожек качения, к изменению физико-механических характеристик поверхностного слоя, к появлению прижогов, внутренних напряжений и микротрещин, что уменьшает долговечность и другие эксплуатационные свойства подшипников [8, 9]. Исследования отечественных и зарубежных авторов выявили спектр факторов, влияющих на качество шлифованной поверхности. В работах Д.Г. Евсеева, А.В. Королева, Е.Н. Маслова и других ученых установлены основные закономерности формирования физико-механических свойств поверхностного слоя с учетом тепловых процессов в зоне резания, в том числе, условия, приводящие к образованию различных дефектов поверхностного слоя. В работах Л.Н. Филимонова, Г.Б. Лурье, Л.В. Худобина и других авторов рассмотрено влияние на качество обработанной поверхности скорости вращения круга, его балансировки, неравномерности износа, засаливания и затупления круга, средств и способов подачи СОЖ, вибрации станочной системы.

Доминирующее влияние на качество ТП оказывает техническое состояние автоматизированных металлорежущих станков (АМС) и выбор значений параметров режима резания. В этом случае мониторинг шлифовальных АМС, на которых выполняется финишная обработка дорожек качения колец подшипников, приобретает важнейшее значение. Обобщенная схема автоматизированного контроля АМС в рамках системы мониторинга представлена на рис. 1.



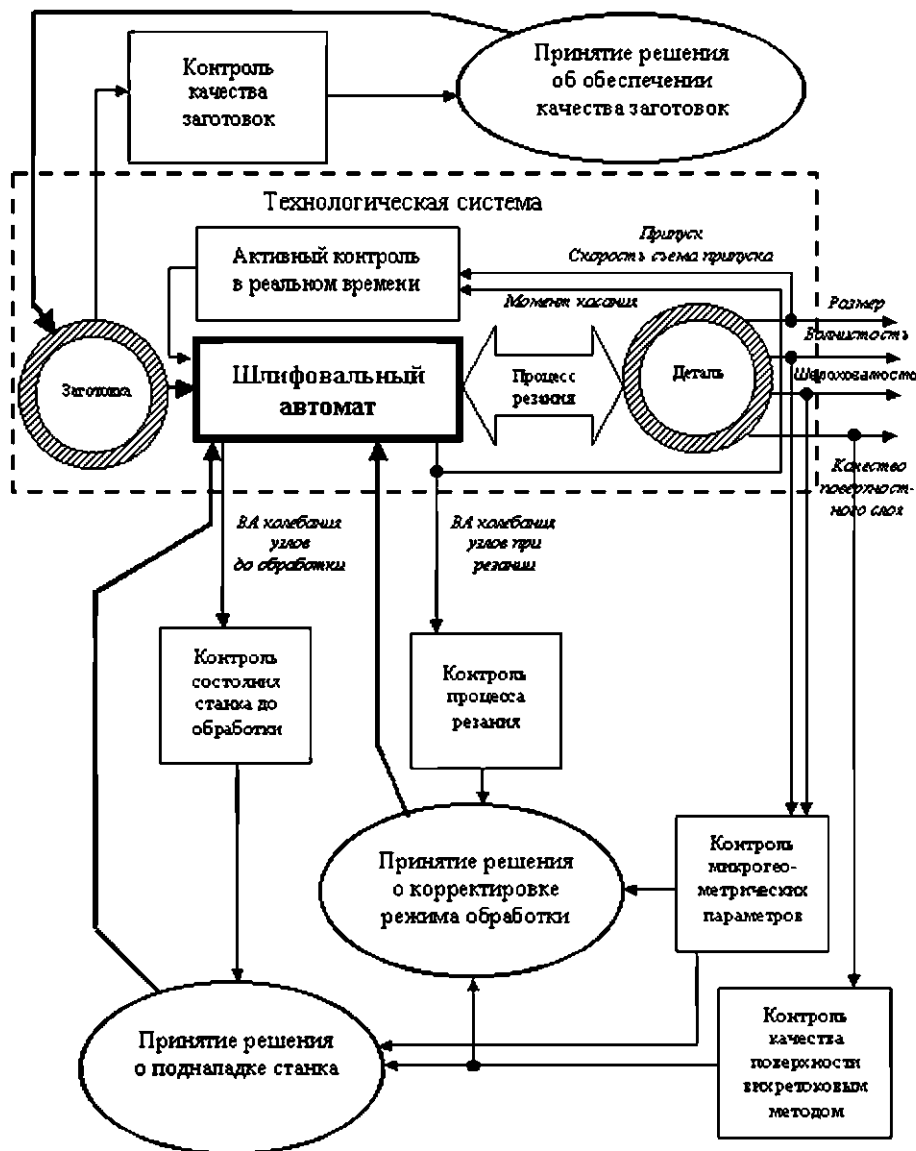


Рис. 1. Схема автоматизированного контроля шлифовального станка в рамках системы мониторинга

Она включает контроль различных параметров станка, заготовки, режима резания и обработанной детали [3], причем наиболее важным является оценка динамического качества станков виброизмерительными средствами и контроль однородности структуры поверхностного слоя дорожек качения колец вихретоковым методом.

Контроль геометрических параметров точности деталей осуществляется с помощью хорошо известных измерительных приборов, в то время как вихретоковый контроль колец и роликов еще недостаточно внедрен в практику отечественных предприятий. В ОАО «ЕПК-Саратов» для контроля дорожек качения колец используется автоматизированный прибор вихретокового контроля ПВК-К2М [3]. Все функции прибора осуществляются под управлением компьютера, который рассчитывает траекторию и управляет перемещением вихретокового датчика по контролируемой поверхности, автоматически настраивает режимы работы преобразователя, записывает сигналы, а затем осуществляет обработку результатов измерений и их визуализацию. Распознавание вида дефектов может выполняться оператором по

специальному классификатору, однако в последнее время прошли апробацию ряд алгоритмов автоматизированного распознавания дефектов [10, 11]. Разработанный прибор отличается высокой чувствительностью и помехоустойчивостью при выявлении различных дефектов за счет сравнения образа контролируемой детали по информативным признакам с образами эталонных деталей: бездефектных и имеющих известные дефекты, выявленные другими методами. На экране монитора формируется развертка контролируемой поверхности качения и развертка сигнала вихретокового датчика за один проход (рис. 2). Каждый дефект оценивается в зависимости от его глубины по десятибалльной шкале, причем чем выше балл, тем выше однородность поверхностного слоя и, следовательно, его качество. Изображение на рис. 2, б отражает влияние вибраций на однородность структуры, а изображение на рис. 2, в – наличие трещины в поверхностном слое дорожки качения.

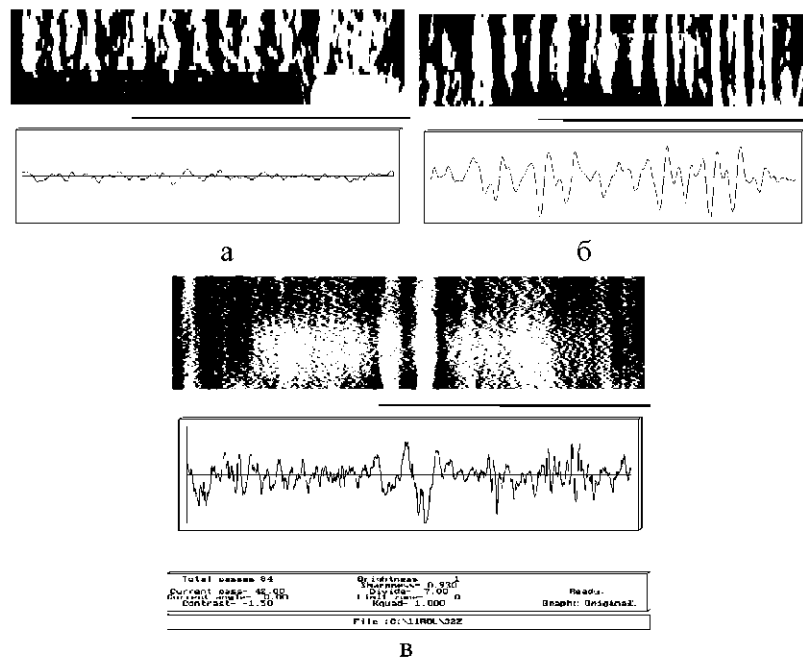


Рис. 2. Компьютерное изображение развертки дорожки качения кольца 208/02 и сигнал вихретокового датчика за один проход: а – бездефектная поверхность, б – неоднородная поверхность, в – трещина в поверхностном слое

Время контроля одной детали зависит от размеров колец и составляет 10...40 с. Объем выборки составляет 2..5 деталей. Переналадка прибора с одного кольца на другое заключается в выборе соответствующей программы для компьютера.

Накопление статистических данных о видах дефектов по станкам, по типам колец и других в СМТП позволяет произвести анализ результатов контроля, выявить причины возникновения дефектов и сформулировать соответствующие рекомендации для выработки корректирующих воздействий на ТП. Управление качеством шлифовальной обработки колец по результатам автоматизированного вихретокового контроля, как показано на рис. 1, осуществляется путем настройки режимов шлифования, обеспечивающих высокую производительность и одновременно необходимую однородность поверхностного слоя, с последующим контролем технического состояния шлифовальных АМС по динамическим характеристикам и ТП на основе статистической информации о состоянии поверхностного слоя деталей, обработанных на каждом станке [3, 10].

Динамическое качество станков является одним из доминирующих факторов, влияющих как на геометрические параметры точности деталей, так и на физико-механические характеристики обработанного поверхностного слоя. Динамикой станков занимались В. А. Кудинов,

М.М. Аршанский, М.П. Козочкин и ряд других ученых [8, 12-15]. Следует отметить, что индивидуально каждый станок обладает определенным динамическим качеством, изменяющимся как в процессе функционирования, так и при вариации значениями параметров режима резания, поэтому при изготовлении высокоточных деталей для машино- и приборостроения целесообразным является оценка реального динамического качества станков по характеристикам виброакустических (ВА) колебаний, что отражено на рис 1. Важным моментом для условий производства является то, что, во-первых, может быть определено динамическое качество каждого станка (если обрабатываются аналогичные детали и применяются сходные режимы резания), во-вторых, для каждого станка могут быть определены значения параметров режима резания, при которых уровень ВА колебаний основных узлов, участвующих в процессе формообразования, минимален, так что в этом случае обеспечивается высокое качество обработки [3, 7, 16-18]. В качестве основных узлов ДС, на которых контролировались вибрации, выбраны шпиндельные узлы детали и инструмента (абразивный круг). Датчики виброизмерителя ВШВ-003М3 устанавливались на узлы на магнитных опорах, а далее сигналы (диапазон до 4 кГц) обрабатывались компьютером по специальным алгоритмам.

При обработке колец подшипников на шлифовальных станках различных моделей получены различные оценки ВА колебаний динамической системы (ДС), на основе которых, во-первых, осуществлялась оценка динамического качества станка, во-вторых, корректировались значения параметров режима резания с получением заданной точности обработки. В качестве таких оценок использовались, в частности, интегральные оценки спектральных плотностей и интегральные оценки автокорреляционных функций (АКФ) ВА колебаний, а также запас устойчивости ДС станка [3, 16, 18].

Выполним обоснование того, что закономерность измерения интегральных оценок спектральной плотности ВА колебаний аналогична как изменению интегральных оценок АКФ, так и запаса устойчивости ДС, вследствие чего их с равным правом можно использовать для оценки динамического качества станков.

Один из методов оценки динамического качества шлифовальных станков базируется на определении АКФ ВА колебаний, причем используется два варианта дальнейшей обработки АКФ  $K(\tau)$  с помощью специализированного программно-математического обеспечения (ПМО).

Первый вариант связан с формированием интегральных оценок АКФ в виде [18]

$$I_A = \int_0^{\tau_k} K^2(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $\tau_k$  – время корреляции.

Этот вариант ранее апробирован для выбора целесообразной частоты вращения заготовки при обработке на прецизионном токарном модуле типа ТПАРМ [16]. По минимуму интегральной оценки (1) назначалась частота вращения шпинделя, при которой минимальны как параметры шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  (порядка 0,1 мкм), так и время обработки детали.

Второй вариант использования АКФ базируется на вычислении передаточной функции ДС при резании, причем предполагается, что сила резания, возбуждающаяся ДС, является сигналом типа «белый шум» [13, 14]. Основываясь на этом установлено, что вычисленный из передаточной функции показатель колебательности  $M$ , на основе которого оценивается запас устойчивости ДС, изменяется аналогично с изменением интегральной оценки  $I_A$ , а также может использоваться для выбора режима резания. В известной работе В.А. Бесекерского [19] этот показатель используется для оценки запаса устойчивости, при этом чем ниже значение показателя, тем выше запас устойчивости ДС.

Для оценки динамического качества АМС, в том числе и при различных режимах резания, апробировано применение интегральной оценки спектральной плотности  $S(\omega)$  ВА колебаний ДС вида

$$I_A = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega, \quad (2)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  – нижняя  $\omega_1$  и верхняя границы диапазона частот измеряемых ВА колебаний ДС.

В работах [3, 5] установлено, что интегральные оценки спектральной плотности  $S(\omega)$  ВА колебаний могут служить для оценки динамического качества круглошлифовальных станков SWaAGL-50. Из результатов исследований внутришлифовальных станков модели SIW-5 видно (рис. 3), что значение параметра качества «волнистость» дорожки качения минимально для станка № 395, имеющего наименьшие значения интегральных оценок АКФ и интегральных оценок спектра  $I_c$ .

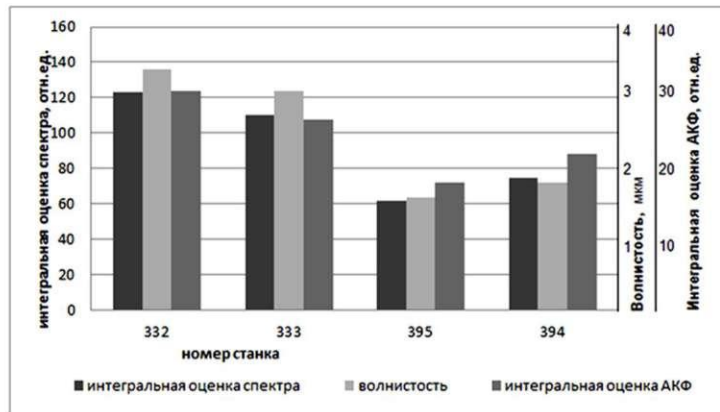


Рис. 3. Значения интегральных оценок спектра и интегральных оценок АКФ для внутришлифовальных станков SIW-5 и волнистость дорожек качения колец подшипников (среднее значение по 5 кольцам, допустимое значение 2 мкм)

В работах [3, 16] указано, что для шлифовальных станков вид экспериментальных АКФ может быть аппроксимирован формулой

$$K(\tau) = K_0 e^{-\alpha\tau} \cos \omega_0 \tau, \quad (3)$$

где  $K_0$  – значение АКФ при  $\tau = 0$ , которое без потери общности можно принять  $K_0 = 1$ ;  $\alpha$  – коэффициент затухания,  $\omega_0$  – частота затухающих колебаний АКФ.

Покажем, что интегральные оценки  $I_A$  и  $I_c$  имеют аналогичные закономерности изменения при увеличении  $\alpha$ .

Спектральная плотность (или просто спектр)  $S(\omega)$  связана с АКФ известным соотношением

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (4)$$

В силу того, что АКФ является четной функцией, из (4) следует выражение

$$S(\omega) = 2 \int_0^{\infty} K(\tau) \cos \omega\tau d\tau. \quad (5)$$

Подставив в (5) выражение для АКФ (3) при  $K_0 = 1$  имеем

$$S(\omega) = 2 \int_0^{\infty} e^{-\alpha\tau} \cos(\omega_0\tau) \cos \omega\tau d\tau. \quad (6)$$

Вычисление интеграла приводит к следующему выражению

$$S(\omega) = \frac{2\alpha(\alpha^2 + \omega^2 + \omega_0^2)}{[\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2][\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2]}. \quad (7)$$

Вычислить интегральную оценку  $I_c$  от выражения (7) достаточно сложно, поэтому разложим его правую часть на два слагаемых по методу неопределенных коэффициентов:

$$\frac{\alpha(\alpha^2 + \omega^2 + \omega_0^2)}{[\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2][\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2]} = \frac{A\alpha + B}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} + \frac{C\alpha + D}{\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2}. \quad (8)$$

Выполнив соответствующие алгебраические преобразования получаем значения коэффициентов  $A = C = 0,5$ ;  $B = D = 0$ .

Выражение (7) в этом случае преобразуется к виду:

$$S(\omega) = \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2}. \quad (9)$$

Интегральная оценка от первого слагаемого  $I_{c1}(\alpha)$  формулы (9) равна

$$I_{c1}(\alpha) = \alpha \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2} = \arctg\left(\frac{\omega + \omega_0}{\alpha}\right) \Big|_{\omega_1}^{\omega_2} \quad (10)$$

Интегральная оценка от второго слагаемого  $I_{c2}(\alpha)$  формулы (9) равна

$$I_{c2}(\alpha) = \alpha \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} = \arctg\left(\frac{\omega - \omega_0}{\alpha}\right) \Big|_{\omega_1}^{\omega_2} \quad (11)$$

Для выявления тенденции изменения интегральной оценки  $I_{c1}(\alpha)$  при увеличении коэффициента затухания  $\alpha$  вычислим производную по  $\alpha$  и определим ее знак. С учетом формул (10) и (11) имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dI_c(\alpha)}{d\alpha} &= \frac{dI_{c1}(\alpha)}{d\alpha} + \frac{dI_{c2}(\alpha)}{d\alpha} = \\ &= -\frac{\omega_2 + \omega_0}{\alpha^2 + (\omega_2 + \omega_0)^2} + \frac{\omega_1 + \omega_0}{\alpha^2 + (\omega_1 + \omega_0)^2} - \frac{\omega_2 - \omega_0}{\alpha^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2} + \frac{\omega_1 - \omega_0}{\alpha^2 + (\omega_1 - \omega_0)^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Первое и третье слагаемые в (12) меньше нуля. После алгебраических преобразований можно показать, что сумма второго и четвертого слагаемых также меньше нуля с учетом того, что  $\omega_1 < \omega_0 < \omega_2$ . Следовательно,  $dI_c(\alpha)/d\alpha < 0$ , то есть интегральная оценка спектра является монотонно убывающей, так же как интегральная оценка АКФ и показатель колебательности.

Таким образом, рассмотренные оценки могут служить оценкой динамического качества станков.

Сопоставительный анализ результатов измерений на круглошлифовальных станках SWaAGL-50 показал (рис. 4, рис. 5), что параметры точности дорожек качения колец достаточно хорошо коррелируют с динамическим качеством станков, характеризуемым интегральными оценками спектров ВА колебаний, причем чем ниже значения оценок, тем выше динамическое качество станка.

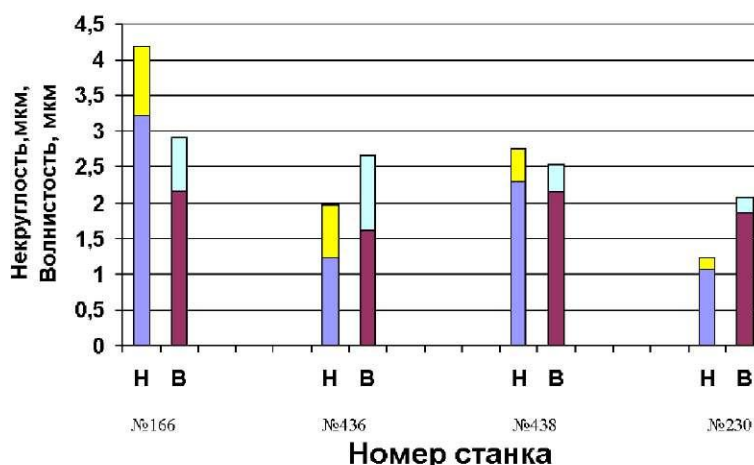


Рис. 4. Значения овальности (Н) и волнистости (В) колец, обработанных на круглошлифовальных станках SWaAGL-50 (тоном в столбиках выделены минимальные и максимальные значения)

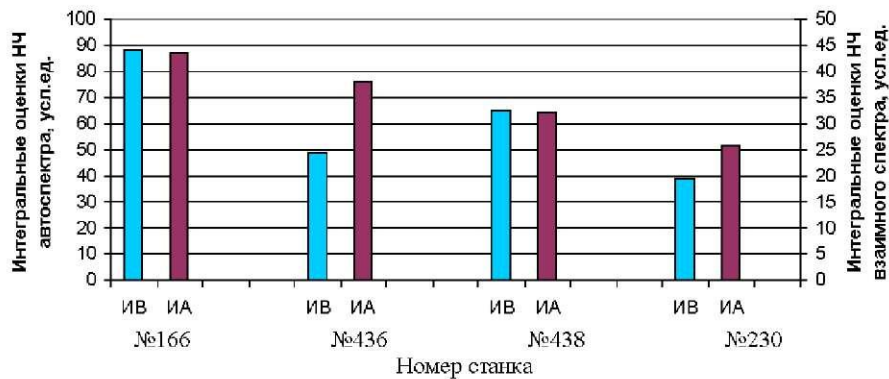


Рис. 5. Значения интегральных оценок спектров колебаний станков SWaAGL-50:  
 ИА – интегральная оценка автоспектра колебаний опоры кольца,  
 ИВ – интегральная оценка взаимного спектра колебаний опоры кольца и ШУ круга

Аналогичная связь качества обработанной поверхности качения колец с динамическим качеством станков наблюдалась для внутришлифовальных станков SIW-4 (рис. 6), причем в этом случае оценкой динамического качества служил показатель колебательности ДС. Однородность структуры поверхностного слоя, оцениваемая в баллах вихретоковым методом, также коррелирует со значениями волнистости дорожки качения.

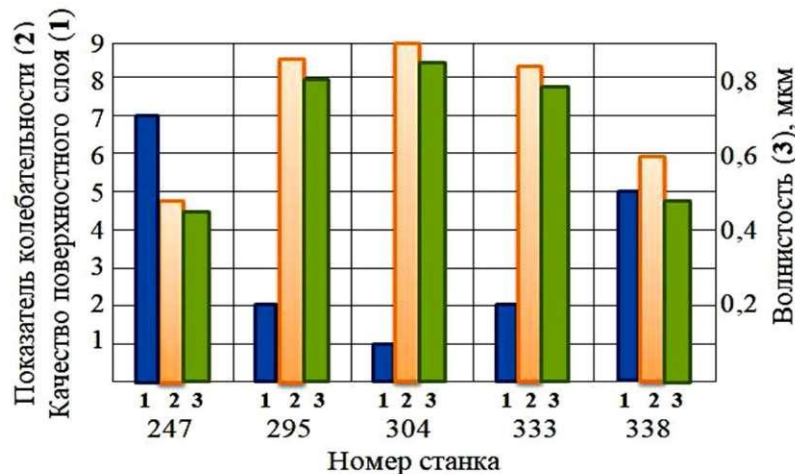


Рис. 6. Взаимосвязь качества обработанной поверхности качения колец с динамическим качеством станков для внутришлифовальных станков SIW-4

Таким образом, оценка динамического качества АМС по результатам обработки данных измерений ВА колебаний позволяет, во-первых, ранжировать станки по динамическому качеству, во-вторых, по минимальному значению интегральной оценки спектра или показателя колебательности определить станок с наименьшим значением волнистости дорожки качения кольца подшипника и наибольшей однородностью поверхностного слоя, в-третьих, дать рекомендации на проведение восстановительных работ на станках, не удовлетворяющих заданным значениям качества обработки.

Автоматическое управление режимами шлифования с контролем текущего припуска реализуется приборами активного контроля (АК) размеров, получившими широкое распространение в подшипниковой промышленности [3, 20, 21]. При высокопроизводительном шлифовании дорожек качения колец АК обеспечивает точность размеров, необ-

ходимую для селективной сборки подшипников. Развитие АК с использованием микропроцессорной техники позволяет за счет увеличения числа контролируемых параметров, по которым оптимизируется процесс шлифования, расширить функции приборов. Это приводит, с одной стороны, к усложнению приборов контроля, но, с другой стороны, получаемая измерительная информация об изменении параметров деталей и ТП позволяет осуществить оперативный контроль режима обработки и обеспечить высокое качество поверхностного слоя дорожек качения колец.

Автоматическое распределение режимов шлифования по припуску, осуществляемое приборами АК, может быть более или менее эффективным в зависимости от набора контролируемых параметров и способов обработки информации о процессе и о результатах шлифования. К числу дополнительных контролируемых параметров следует отнести уровень вибраций в ДС и скорость съема припуска, что отражено на рис 1. Измерение вибрации ДС позволяет контролировать не только собственно процесс шлифования, но и правку круга.

Отклонения параметров точности деталей определяются рядом факторов: отклонениями геометрических параметров точности заготовки (зависящими от технологии производства заготовок), исправляющей способностью процесса шлифования (зависящей от жесткости станка, величины поперечной подачи, характеристик круга, физико-механических свойств СОТС и других) и времени обработки детали.

Известно, что исправляющая способность процесса шлифования возрастает с увеличением поперечной подачи, однако этот способ повышения точности обработки ограничен необходимостью обеспечения заданных физико-механических свойств поверхностного слоя, так как при увеличении подачи повышается температура в зоне резания. Таким образом, для повышения стабильности параметров качества шлифованных поверхностей качения колец целесообразно формировать дополнительные ограничения на величину поперечной подачи, которые обеспечивают исправление отклонений геометрических параметров с заданной точности за время обработки детали, что создает предпосылки для повышения производительности шлифовальных операций, а также обеспечивает необходимую однородность поверхностного слоя.

Выше на рис. 1 отражена схема многопараметрового АК, включающего управление режимами обработки в реальном времени с учетом результатов мониторинга ТП. Два измерительных канала (текущий припуск и вибрация жесткой опоры) аппаратно принадлежат прибору АК, который является частью системы управления. Измерительная информация о текущем припуске используется для вычисления скорости съема припуска [3, 21]. Управление циклом осуществляется путем переключения поперечной подачи по величине припуска и выполнению ограничений на скорость съема припуска и вибрации жесткой опоры, определяемых при обучающем эксперименте.

Информация о математическом ожидании и дисперсии отклонений геометрических параметров заготовки передается в СМТП для принятия решения о подналадке или ремонте станка и корректировке требований к точности заготовок. Контроль поверхностного слоя дорожек качения колец осуществляется внешними по отношению к станку измерительными средствами – автоматизированными приборами вихретокового контроля, информация с которых передается в СМТП.

Выполнено моделирование динамики съема припуска (рис. 7) и проведены экспериментальные исследования отклонений геометрических параметров точности колец на внутришлифовальных станках SIW-4, оснащенных микропроцессорным прибором АК. Шлифовалась дорожка качения наружных колец шарикового радиально-двухрядного подшипника 256907 из стали ШХ15. Запись сигнала датчика припуска осуществлялась прибором АК с частотой дискретизации 5 кГц. Далее вычислялась скорость съема припуска и в случае ее приближения к допустимой величине снижалась подача круга.

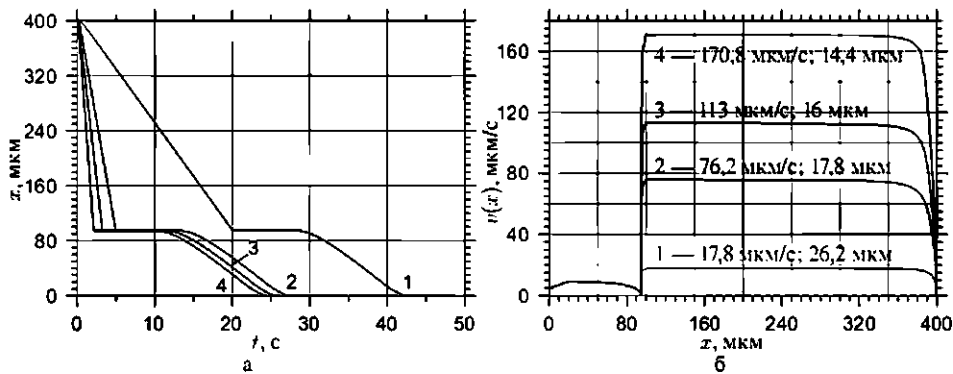


Рис. 7. Моделирование динамики съема припуска на различных подачах:  
 а – изменение припуска во времени;  
 б – распределение скорости съема припуска по припуску

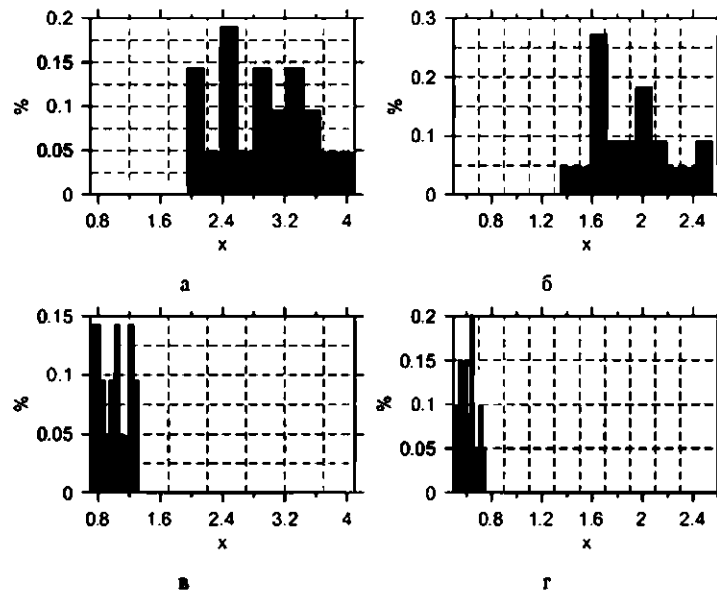


Рис. 8. Гистограммы распределения отклонений параметров точности (а, в – овальность; б, г – огранка) при использовании аналогового прибора активного контроля «ЭКОМ» (а, б) и микропроцессорного прибора АК (в, г)

Применение экспериментального образца микропроцессорного прибора АК в производственных условиях ОАО «ЕПК-Саратов» для управления точностью шлифовальной обработки колец подшипников способствовало снижению отклонений геометрических параметров точности поверхностей качения (рис. 8). Интегрирование микропроцессорных приборов АК в СМТП способствует не только повышению качества обработки колец подшипников, но и получению и накоплению объективной информации о состоянии ТП на каждом станке индивидуально, что необходимо для принятия решения о корректировке ТП в случае его разладки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практические результаты по автоматизации измерений в рамках СМТП, включающие оценку однородности физико-механических свойств поверхностей качения деталей подшипников вихретоковым методом, оценку динамического качества АМС по виброакустическим характеристикам, а также многопараметровый АК процесса шлифования, направлены на ре-



шение комплекса задач по обеспечению качества продукции и выполняют функцию обратной связи в системе управления качеством продукции. Эффективность мониторинга в значительной степени определяется степенью автоматизации получения и обработки информации от датчиков состояния станка, процесса обработки и качества деталей, а также от возможностей программного обеспечения. Особенности мониторинга ТП проявляются в запаздывании формирования информации о состоянии его компонентов и принятии решения о корректирующем воздействии, однако, автоматизация измерений определяющих параметров способствует реализации комплекса организационно-технических мероприятий, что обеспечивает эффективное управление и заданное качество деталей подшипников.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Всеобщее управление качеством / О.П. Глудкин, Н.М. Горбунов, А.И. Гуров и др. М.: Радио и связь, 1999. 600 с.
2. Пуш А.В. Моделирование и мониторинг станков и станочных систем / А.В. Пуш // СТИН. 2000. № 9. С. 12-20.
3. Игнатъев С.А., Горбунов В.В., Игнатъев А.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: СГТУ, 2009. 160 с.
4. Игнатъев А.А., Горбунов В.В., Игнатъев С.А. Организация системы мониторинга технологического процесса // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2008. С. 71-75.
5. Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве / А.А. Игнатъев, В.В. Горбунов, В.А. Добряков и др. Саратов: СГТУ, 2004. 124 с.
6. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
7. Игнатъев А.А., Сигитов Е.А. Технологический процесс обработки резанием как объект управления // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2018. С. 38-41.
8. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
9. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А., Дунин-Барковский И.В. Предотвращение дефектов при шлифовании. М.: Машиностроение, 1975. 144 с.
10. Игнатъев А.А., Шумарова О.С., Игнатъев С.А. Распознавание дефектов поверхностей качения колец подшипников при автоматизированном вихретоковом контроле с применением вейвлет-преобразований. Саратов: СГТУ, 2017. 108 с.
11. Самойлова Е.М., Игнатъев А.А. Методы и алгоритмы интеллектуализации мониторинга технологических систем на основе автоматизированных станочных модулей. Саратов: СГТУ, Ч.3. 2019. 84 с.
12. Аршанский М.М., Щербаков В.П. Вибродиагностика и управление точностью на металлорежущих станках. М.: Машиностроение, 1989. 136 с.
13. Попов В.И., Локтев В.И. Динамика станков. Киев: Техника, 1975. 136 с.
14. Lin Z.H., Hodgson D.C., In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures // Int. J. Mach. Tools Manufact. 1988. V. 28. № 2. P. 93-101.
15. Козочкин М.П. Влияние динамических характеристик станков на вибрации при резании // СТИН. 2014. №2. С. 4-9.
16. Игнатъев А.А., Каракозова В.А., Игнатъев С.А. Стохастические методы идентификации в динамике станков. Саратов. СГТУ. 2013. 124 с.
17. Ignat'ev A.A., Karakozova V.A., and Ignat'ev S.A. Transfer Function and Margin of Stability in the Dynamic System of a Grinding Machine // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35 No. 2. P. 123-125.

18. Игнатъев А.А., Самойлова Е.М., Шамсадова Я.Ш. Оценка динамического качества станков с применением автокорреляционных функций виброакустических колебаний // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2 (42). С. 90-98.

19. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.

20. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. М.: Машиностроение, 1975. 304 с.

21. Васин М.П., Горбунов В.В., Игнатъев А.А. Управление шлифованием колец высокоточных подшипников с адаптацией режимов шлифования // СТИН. 2007. № 7. С. 29-34.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

**Добряков Владимир Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Игнатъев Станислав Александрович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Alexander A. Ignatyev** – Dr. Sc. (Engineering), Professor, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Vladimir A. Dobryakov** – PhD (Technical Science), Associate Professor Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Stanislav A. Ignatyev** – Dr. Sc. (Engineering), Professor Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov  
E-mail: atp@sstu.ru

*Статья поступила в редакцию 20.02.20. принята к опубликованию 15.03.20*

**Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский,  
Д.А. Васильев, Д.Ю. Петров**

## **МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ВЫБОРА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАФЕДРОЙ**

*Аннотация.* В статье описана методика многокритериального выбора, предлагаемая для применения в системе управления кафедрой высшего учебного заведения. Методика продемонстрирована на конкретном примере выбора обучающимся направления научно-исследовательской работы и ее руководителя. Предложен алгоритм работы системы поддержки принятия решения, реализующей данную методику.

*Ключевые слова:* критерии, нечёткая мера, оценки, оптимальный выбор, интеграл Сугено, кафедра

**E.E. Mirgorodskaya, N.P. Mityashin, Yu.B. Tomashevskiy,  
D.A. Vasiliev, D.Yu. Petrov**

## **MULTI-CRITERIA SELECTION PROBLEMS IN THE SYSTEM OF DEPARTMENT MANAGEMENT**

*Abstract.* The presented multi-criteria selection methodology can be introduced into the system of department management at a tertiary educational institution. The new methodology is demonstrated with specific reference to the research direction and academic adviser of a student. The suggested algorithm can be utilized in the system of decision support based on the developed methodology.

*Keywords:* criteria, fuzzy dimension, estimates, premier choice, Sugeno integral, department

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

В настоящей работе развивается методика процедуры многокритериального выбора в управлении кафедрой высшего учебного заведения и, в частности, процесса выбора направления научно-исследовательской работы (НИР) обучающегося и ее руководителя. При этом принимается во внимание, обычно игнорируемое, проявление системного взаимодействия критериев.

На кафедре «Системотехника и управление в технических системах» СГТУ имени Гагарина Ю.А. ведется работа по созданию программных систем поддержки принятия решений при выборе направления научно-исследовательской работы обучающегося. Идея состоит в формализации проблемы и использовании адекватного решаемой задаче аппарата теории нечетких множеств. Существенно, что предлагаемая методика может быть применена при решении других задач принятия решения при управлении кафедрой.

### **МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ**

Среди методов решения многокритериальных задач оптимального выбора основной класс образуют методы скаляризации, заключающиеся в сведении многокритериальной задачи к однокритериальной посредством свертки частных критериев.

Под сверткой понимают функционал, зависящий от значений частных критериев. Простейшим функционалом является линейный функционал вида:

$$\varphi(x) = \sum_i w_i \cdot \varphi_i(x), \quad (1)$$

где  $x$  – оцениваемая альтернатива;  $\varphi_i(x)$  – значение частного критерия  $\varphi_i$  на этой альтернативе;  $w_i$  – коэффициенты, отображающие важность (ценность) критерия  $\varphi_i$ , или весовые коэффициенты.

Кроме линейного функционала применяют нелинейные функционалы. Частным случаем такого функционала является функционал Винера:

$$W(x) = \sum_i w_i \cdot \varphi_i(x) + \sum_i \sum_j w_{ij} \cdot \varphi_i(x) \cdot \varphi_j(x). \quad (2)$$

Нелинейная часть этого функционала отображает взаимодействие ценностей критериев. В данном случае речь идет о взаимовлиянии пар критериев, поскольку во втором слагаемом присутствуют произведения вида  $\varphi_i(x) \cdot \varphi_j(x)$ .

Использование формулы (2) при оценке альтернатив означает признание факта взаимного влияния критериев, которое игнорируется в формуле (1). Однако если имеет место такое взаимное влияние для пар критериев, то следует предположить возможность такого эффекта и для любого другого количества критериев. Учет подобных влияний в виде формулы (2) приведет к ее усложнению и введению коэффициентов влияния вида  $w_{ijk}, w_{ijks}$  и т.д.

Ясно, что даже обоснование конкретных значений весовых коэффициентов в формуле (1) представляет значительные трудности. Тем более, это относится к проблеме назначения обоснованных значений коэффициентов большей размерности, т.е.  $w_{ij}, w_{ijk}, w_{ijks}$  и т.д.

В связи с этим представляет интерес альтернативный подход к моделированию взаимного влияния критериев, предложенный М. Сугено [1, 2]. Главным в предлагаемом подходе является понятие нечеткой меры, которая имеет смысл меры ценности подмножеств критериев. Особенность нечеткой меры заключается в её неаддитивности, иначе говоря, мера ценности некоторого подмножества критериев не равна сумме ценностей одноэлементных множеств, состоящих из критериев этого подмножества. Это свойство позволяет отображать взаимодействие ценностей критериев.

Настоящая работа посвящена анализу различных свертки, основанных на понятии нечеткой меры, интеграла Сугено и его обобщений [3]. Эти свертки являются альтернативами формул (1) и (2), используемых на практике при решении многокритериальных задач.

Нечеткой мерой называется неотрицательная функция  $g(\cdot)$ , определенная на подмножествах конечного множества  $X$ , и обладающая следующими свойствами:

1.  $g(\emptyset) = 0, g(X) = 1$ ;
2. если  $A, B \in 2^X$  и  $A \subset B$ , то  $g(A) \leq g(B)$ .

Частным случаем нечеткой меры является  $\lambda$ -нечеткая мера  $g_\lambda(\cdot)$ , введенная Сугено с помощью  $\lambda$ -правила, состоящим в следующем [1, 4]. Для каждой пары непересекающихся подмножеств  $E, F$  множества  $X$  выполняется соотношение

$$g_\lambda(E \cup F) = g_\lambda(E) + g_\lambda(F) + \lambda \cdot g_\lambda(E) \cdot g_\lambda(F); -1 < \lambda < \infty.$$

В случае решения многокритериальных задач множество  $X$  есть множество критериев этой задачи. При  $\lambda > 0$  происходит усиление степени ценности подмножества критериев по сравнению с суммой меры ценностей всех его элементов, при  $\lambda < 0$  – ослабление степени ценности. Неаддитивность меры может быть полезна для отображения того факта, что в определенных сочетаниях отдельные критерии могут усиливать или ослаблять ценность совокупности критериев, т.е. при взаимном влиянии критериев в задачах многокритериаль-

ной оптимизации. Далее при применении нечеткой меры будем использовать первый вариант, когда взаимное влияние критериев приводит к усилению ценности критериев.

Степень ценности критериев служит для определения значения некоторого интегрального показателя, который будем рассчитывать с помощью интеграла Сугено [1, 2].

Степень выполнения требований по критерию  $u_i(x)$  для варианта выбора  $x$  обозначим  $\mu_i(x)$ , причем  $0 \leq \mu_i(x) \leq 1$ . Будем считать, что на множестве  $2^U$ , где  $U = \{u_i\}$  – множество критериев, введена нечеткая мера  $g(\cdot)$ , отражающая ценность всевозможных подмножеств критериев.

Рассмотрим величину  $\alpha \in [0,1]$ , имеющую смысл степени выполнения требований лица, принимающего решение (ЛПР), по критериям. Для фиксированного значения  $\alpha$  и варианта выбора  $x$  обозначим через  $M_\alpha(x)$  множество тех критериев  $u_i$ , для которых степень выполнения требований ЛПР на варианте  $x$  не ниже  $\alpha$ , т.е.  $M_\alpha(x) = \{u_i | \mu_i(x) \geq \alpha\}$ .

Будем увеличивать величину  $\alpha$ . Очевидно, что чем больше  $\alpha$  или чем выше уровень притязания ЛПР к степени выполнения требований, тем уже множество  $M_\alpha(x)$ . При этом мера ценностей множества показателей  $M_\alpha(x)$ , максимальная и равная 1 при  $\alpha = 0$ , будет уменьшаться за счет исключения из него тех показателей, для которых  $\mu_i(x)$  становится меньше увеличивающегося  $\alpha$ .

Для ЛПР важно, чтобы степени выполнения требований ЛПР  $\alpha$  была велика, но при этом не менее важно, чтобы мера ценности  $g(M_\alpha(x))$  также была велика. Поскольку обе эти величины изменяются от 0 до 1, но в противоположных направлениях, компромисс будет достигнут, когда они сравняются. При этом компромиссное значение равно

$$S(x) = \max_{\alpha} \min(\alpha, g(M_\alpha(x))).$$

Данную величину, называемую в общем случае интегралом Сугено, можно считать интегральным показателем качества варианта выбора  $x$ , учитывающим меру ценности критериев.

Интеграл Сугено позволяет каждому варианту выбора поставить в соответствие число из отрезка  $[0, 1]$ , что позволяет свести многокритериальную задачу к скалярному выбору.

### **ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ**

Предлагаемый алгоритм системы поддержки принятых решений состоит в назначении элементов множества  $P$  (множества «студентов») на позиции в множестве  $T$  (множестве «тем») и включает следующие этапы:

1. формирование моделей множеств  $P$  и  $T$ ;
2. формирование матрицы  $R$  оценок соответствия элементов  $P$  и  $T$ ;
3. решение задачи о назначении, в результате которой происходит требуемое назначение.

На этапе формирования моделей множеств  $P$  и  $T$  для их последующего согласования выбирается множество  $C = \{c_j\}$  обобщенных показателей, число  $n$  которых рекомендуется выбирать от 5 до 8. Каждый студент  $S_i$  характеризуется  $n$ -мерным вектором  $\bar{X}_i$  значений обобщенных показателей

$$\bar{X}_i = (x_i^1, \dots, x_i^j, \dots, x_i^n).$$

Значение  $j$ -го обобщенного показателя  $c_j$  для  $i$ -го студента  $x_i^j$  является функцией множества частных показателей – оценок, полученных  $i$ -м студентом на экзаменах, зачетах, по курсовым работам и проектам по всем дисциплинам и практикам учебного плана за предшествующие выбору НИР семестры. Величина  $x_i^j$  рассчитывается следующим образом. Вводится нормированная оценка  $\gamma_k^i$ , полученная  $i$ -м студентом по  $k$ -й контролируемой позиции учебного плана, связанная с оценкой  $y_k^i$  так, что оценкам «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» соответствуют значения 1, 0.5 и 0. Дополнительно вводятся весовые коэффициенты  $\alpha_k^j, 0 \leq \alpha_k^j \leq 1$ , задаваемые экспертами и определяющие важность  $k$ -й контролируемой позиции учебного плана для значения  $j$ -го обобщенного показателя  $x_i^j$ .

Тогда объективное значение  $\xi_i^j$   $j$ -го обобщенного показателя  $i$ -го студента (рис. 1) определим по формуле

$$\xi_i^j = \max_k \min(\gamma_k^i, \alpha_k^j).$$

Для выбора студента значение имеет не только полученные им оценки, но и его субъективное отношение к предмету, выражающее его интерес. Учет этого фактора помогает неявным образом выявить систему предпочтений студента, сформировавшуюся в процессе. Соответствующую субъективную оценку, назначаемую самим студентом, обозначим через  $\delta_k^i$ . Она независимо от объективного значения  $\gamma_k^i$ , может быть выбрана из того же набора 1, 0.5 и 0.

№ студента	Математика	Программирование	Дискретная математика	Теория принятия решений	Вычислительная математика	Базы данных	Физика	Электротехника
1	0,8	0,2	1	1	1	1	1	1
2	0,5	0,2	1	0,5	0,5	1	1	0,5
3	0,5	0,2	1	0,5	0,5	0,5	1	0,2
4	0,5	0,2	1	0,5	1	1	1	0,5
5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,2

Рис. 1. Объективные оценки

В результате определяется субъективное значение  $\eta_i^j$   $j$ -го обобщенного показателя для  $i$ -го студента (рис. 2) по формуле

$$\eta_i^j = \max_k \min(\delta_k^i, \alpha_k^j).$$

Окончательно значение  $j$ -го ОП для  $i$ -го студента (рис. 3) найдем по формуле

$$x_i^j = \rho \xi_i^j + (1 - \rho) \eta_i^j.$$

## Информатика, вычислительная техника и управление

Здесь коэффициент  $\rho$  характеризует степень «объективности» обобщенного показателя, причем  $0 \leq \rho \leq 1$ . Очевидно, что чем больше  $\rho$ , тем сильнее учитываются объективные факторы и слабее субъективные предпочтения студента.

Совокупность векторов  $\bar{X}_i$  для всех студентов образуют модель множества  $P$ .

№ студента	Математика	Программирование	Дискретная математика	Теория принятия решений	Вычислительная математика	Базы данных	Физика	Электротехника
1	0,8	0,2	1	1	1	1	1	0,5
2	0,5	0,2	1	0,5	0,5	1	1	0,5
3	0,5	0,2	1	0,5	0,5	0,5	1	0,2
4	0,5	0,2	1	0,5	1	1	1	0,5
5	0,5	0,7	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2

Рис. 2. Субъективные оценки

Модель множества  $T$  строится, как совокупность нечетких мер на множестве обобщенных показателей. Каждая из нечетких мер соответствует конкретной теме множества  $T$  и задается её научным руководителем на основе его представления о том, какие из обобщенных показателей и их сочетания наиболее значимы (ценны) для рассматриваемой темы.

№ студента	Математика	Программирование	Дискретная математика	Теория принятия решений	Вычислительная математика	Базы данных	Физика	Электротехника
1	0,8	0,2	1	1	1	1	1	0,85
2	0,5	0,2	1	0,5	0,5	1	1	0,5
3	0,59	0,2	1	0,5	0,65	0,5	1	0,2
4	0,5	0,2	1	0,5	1	1	1	0,5
5	0,5	0,7	0,41	0,5	0,5	0,5	0,85	0,2

Рис. 3. Обобщенные показатели для студентов

Зафиксируем тему  $\tau \in T$ . Ограничиваясь пока аддитивной мерой, руководитель ставит в соответствие каждому обобщенному показателю  $c_j$  число  $g_j^\tau$ , выражающее ценность освоенных обучающимся дисциплин, формирующее значение этого показателя, для выполнения темы  $\tau$ . Числа  $g_j^\tau$  должны удовлетворять следующим условиям

$$0 \leq g_j^r \leq 1;$$

$$\sum_{j=1}^n g_j^r = 1.$$

В силу аддитивности мера значимости (ценности) некоторого подмножества  $S$  показателей из множества  $C$  равна

$$G^r(S) = \sum_{j \in J_s} g_j^r.$$

Здесь  $J_s$  – множество номеров обобщенных показателей, входящих в  $S$ .

На этапе формирования матрицы  $R$  оценок соответствия элементов  $P$  и  $T$  элементы этой матрицы предлагается рассчитывать по формуле

$$r_{it} = \max_{0 \leq \alpha \leq 1} \min(G_i^r(\alpha), \alpha).$$

Здесь  $G_i^r(\alpha)$  – мера множества обобщенных показателей  $c_j$ , для которых  $x_i^j \geq \alpha$ .

Последнее выражение является нечетким интегралом Сугено, смысл которого в рамках поставленной задачи состоит в следующем. С одной стороны естественно стремление иметь высокие оценки обучающегося по отдельным дисциплинам (условие  $x_i^j \geq \alpha$ ), с другой стороны, важно иметь высокую меру ценности  $G_i^r(\alpha)$  для выполнения работы по данной теме множества тех обобщенных показателей, значения которых достаточно высоки. Ясно, что с желаемым ростом  $\alpha$  мера  $G_i^r(\alpha)$  не увеличивается (практически всегда уменьшается). Поэтому последняя формула позволяет достичь компромисса между этими разнонаправленными стремлениями.

№ студента	Математика	Математика+Электротехника	Математика+Физика	Физика+Программирование
1	1	0,7	1	0,6
2	0,2	0,1	0,4	0,3
3	0,2	0,1	0,4	0,3
4	0,2	0,1	0,4	0,4
5	0	0,3	0,4	0,6
$\alpha$	0,7	0,6	0,7	0,6

Рис. 4. Оценки соответствия элементов  $P$  и  $T$

На заключительном этапе выработки рекомендации обучающимся по выбору темы НИР решается задача о назначении с матрицей  $R = \{r_{it}\}$ , полученной на предыдущем этапе [5]. Решением этой задачи является такое взаимное однозначное отображение  $\tau = \Theta(i)$ , множества  $P$  на некоторые подмножества  $T$ , при котором результирующая степень соответствия этих множеств максимальна, т.е.

$$\sum_{i \in P} r_{i\Theta(i)} \rightarrow \max.$$



№ студента	Математика	Математика+Электротехника	Математика+Физика	Физика+Программирование
1	1			
2			1	
3				1
4			1	
5		1		

Рис. 5. Решение задачи о назначении

Реализацию описанного алгоритма предполагается проводить несколько раз при различных значениях коэффициента «объективности»  $\rho$  с последующим обсуждением результатов преподавателями кафедры и обучающимися с целью выбора наиболее приемлемого варианта.

### Выводы

Предложена и продемонстрирована на примере методика и алгоритм реализации системы многокритериального выбора направления НИР обучающегося и ее руководителя, отличающаяся учетом взаимодействия критериев. Система может быть рекомендована, как средство поддержки принятия решений при управлении кафедрой высшего учебного заведения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sugeno M. Fuzzy measure and fuzzy integral // Trans. SICE. 1972. V.8. P. 95-102.
2. Sugeno M. Analytic representation of fuzzy systems // Fuzzy Automata and Decision Processes. Amsterdam: North-Holland. 1977. P. 177-189.
3. Кузьмиченко Б.М., Митяшин Н.П., Рябов О.Н. Синтез моделей роботизированных сборочных комплексов модульной структуры // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4. С. 27-31.
4. Митяшин Н.П. Применение  $\lambda$ -нечеткой меры при многокритериальном выборе оборудования // Автоматизация и управление в приборо- и машиностроении: межвуз. научн. сб. СГТУ. 2003. С. 146-149.
5. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. М.: Радио и связь, 1989. 320 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Петров Дмитрий Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. Тел. (845-2)-99-88-43.

**Dmitry Yu. Petrov** – Ph.D. (Technical Science), Head: Department of System Engineering and Engineering Systems Control, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Миргородская Екатерина Евгеньевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.  
Тел. (845-2)-99-88-43; (845-2)-22-96-72

**Ekaterina E. Mirgorodskaya** – PhD (Technical Science), Associate Professor Department of System Engineering and Engineering Systems Control, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Митяшин Никита Петрович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.  
Тел. (845-2)-99-88-43; (845-2)-28-32-67.

**Nikita P. Mityashin** – Dr. Sc. (Engineering), Professor, Department of System Engineering and Engineering Systems Control, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Томашевский Юрий Болеславович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.  
Тел. (845-2)-99-88-43; (845-2)-20-78-53

**Yuri B. Tomashevskiy** – Dr. Sc. (Engineering), Professor, Department of System Engineering and Engineering Systems Control, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Васильев Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.  
Тел. (845-2)-99-88-43

**Dmitry A. Vasiliev** – PhD (Technical Science), Associate Professor Department of System Engineering and Engineering Systems Control, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.02.20, принята к опубликованию 15.03.20*

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

---

УДК 621

**А.В. Королев, А.А. Королев**

## ИННОВАЦИОННЫЕ МИКРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Аннотация.* В статье рассматривается одно из научных направлений кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» СГТУ имени Гагарина Ю.А. Дано понятие микроэнергетическая технологии. Приводятся примеры микроэнергетических технологий.

*Ключевые слова:* микроэнергетическая технология, качество, производительность, разлом

**A.V. Korolev, A.A. Korolev**

## INNOVATIONS IN MICRO-POWER TECHNOLOGIES FOR MECHANICAL ENGINEERING INDUSTRIES

*Abstract.* The authors consider one of research areas at the department «Technologies and Control Systems in Mechanical Engineering» of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. The concept of micro-power technology is given, and the cases of micro-power technologies are provided.

*Keywords:* micro-power technology, quality, productivity, fracture

### **ВВЕДЕНИЕ**

Термин «микроэнергетика» был предложен Сетом Дунном (Worldwatch Institute), который к этой категории отнес маломощные генераторы электричества: солнечные батареи, ветрогенераторы, водородные элементы и газовые микротурбины. Однако с учетом развития современных технологий термин «микроэнергетика» необходимо трактовать более широко, как генерацию энергии малыми дозами. В технологии машиностроительного производства иногда используют генерацию технологической энергии малыми дозами. Например, процесс чеканки, ультразвуковой прошивки и другие. Но как технологический принцип микроэнергетического воздействия инструмента на обрабатываемую заготовку впервые был сформулирован и обоснован в работах научной школы технологов-машиностроителей СГТУ имени Гагарина Ю.А. [1-3].

Сущность микроэнергетической технологии заключается в подаче технологической энергии в рабочую зону локально, малыми дозами, но с высокой частотой. В зависимости от вида используемой энергии такая технология может называться микродинамической, микро-световой или микротепловой. В любом случае использование малой единовременной технологической энергии обеспечивает возможность достижения высокого качества обработки, а высокая частота подачи этих малых доз технологической энергии в рабочую зону обеспечивает достижение высокой производительности технологического процесса. В соответствии

с разработанной авторами теории микроэнергетической технологии в качестве одного из универсальных показателей качества изготовления изделий может служить затраченная единовременная работа (энергия).

В качестве примера микроэнергетической технологии можно привести технологию ультразвукового разлома деталей типа колец, осей валов и других [4-6]. К сожалению, до недавнего времени для осуществления технологического разлома применялись не достаточно совершенные способы. Например, разлом наружных колец шарнирных подшипников осуществлялся следующим образом. На торце кольца или на наружной фаске наносят концентратор напряжений, а затем в пневмотисках осуществляют двухстороннее сжатие кольца до разрушения. Указанная технология малоэффективна, так как при разломе деталей критическим нагружением затрачивается значительная единовременная работа, а, следовательно, в значительном объеме детали возникают критические напряжения, линия разлома получается неровная, на поверхности заготовки часто появляются мелкие сколы.

Из-за наличия в материале колец дефектов они, раскалываются часто не только в месте расположения концентратора напряжений, но и в других сечениях, разлом часто получается непрямолинейным, кольца сохраняют остаточную деформацию, теряют точность формы. Отсюда возникают значительные потери из-за брака. Так, например, при разломе в пневмотисках колец подшипника ШСП50 от 10% до 35% деталей от партии отходят в брак по некачественному разлому. Иногда большие партии деталей даже после многократной термической обработки не могут пройти операцию разлома, и вынуждены храниться в изоляторе. Этот неисправимый брак приводит к значительным экономическим потерям.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

С целью устранения отмеченных недостатков предложена микроэнергетическая технология и созданы полуавтоматы «ПАРК» для разлома деталей типа колец подшипников и роликов [7], обеспечивающая высокое качество разлома и предупреждения брака. Сущность предложенной технологии заключается в следующем. Также как и при обычном способе осуществляют двустороннее сжатие заготовки в тисках (рис. 1), но силу сжатия значительно уменьшают, вызывая в месте расположения концентратора напряжений упругий изгиб. Кроме того, губке тисков со стороны концентратора напряжения придают ультразвуковые колебания. Таким образом, технологическая энергия подается в зону обработки периодически малыми дозами, но с высокой частотой.

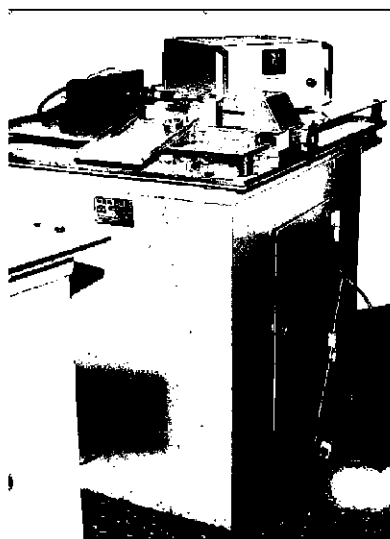


Рис. 1. Фотография полуавтомата ПАРК для микродинамического разлома наружных колец шарнирных подшипников

Одним из результатов такой обработки является значительное повышение качества разлома. На рис. 2 показаны, например, фотографии двух колец после разлома.

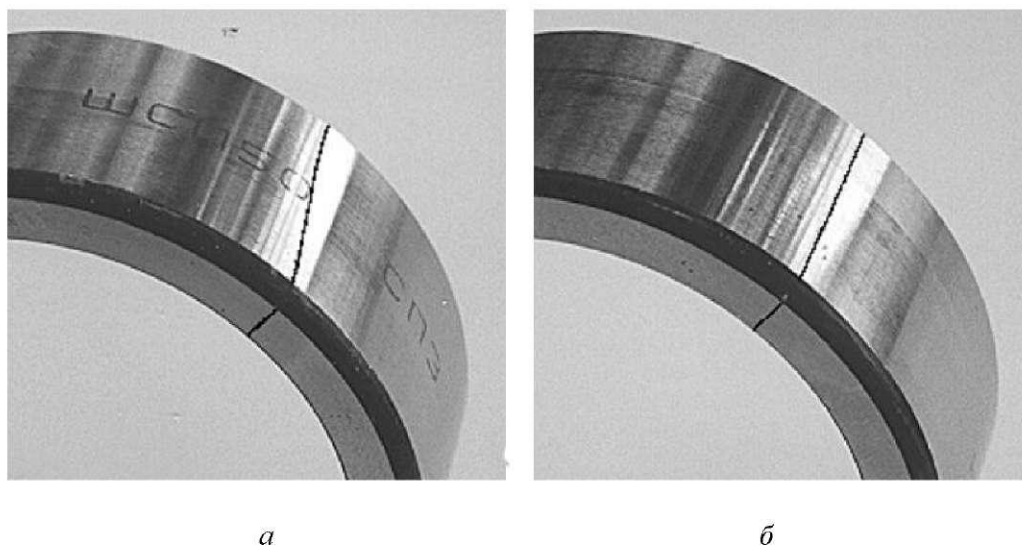


Рис. 1. Фотографии места разлома колец ШСП 50.02:  
а – статический разлом, б – ультразвуковой разлом

Как видно из рис. 1а, при статическом разломе линия разлома располагается под большим углом к образующей кольца. У кольца после ультразвукового разлома (рис. 1б) линия разлома проходит вдоль образующей кольца. Объясняется это тем, что при микроэнергетической технологии необходимый для разлома запас суммарной энергии обеспечивается ультразвуковыми колебаниями инструмента. Ультразвуковые колебания приводят к циклическому нагружению зоны разлома. При каждом таком колебании заготовке сообщается малая доза энергии, со временем эта энергия накапливается и достигает критической величины. Но критические напряжения сосредотачиваются в малом объеме заготовки возле концентратора напряжений. Линия разлома проходит через дефекты материала заготовки, сосредоточенные в узкой полоске, следовательно, линия разлома получается более прямолинейной. Резко снижается вероятность появления крупных дефектов в виде сколов. В процессе разлома заготовка не теряет свои форму и размеры и не возникает опасность разлома вне плоскости расположения концентратора напряжений, что часто наблюдается при статическом разломе. Снижаются требования к предшествующей термической обработке и качеству материала колец.

Микродинамическая технология разлома колец шарнирных подшипников была успешно внедрена в производство и дала высокий экономический эффект. Результаты расчета экономического эффекта приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета экономической эффективности микродинамической технологии разлома колец шарнирных подшипников

№ п/п	Наименование показателей	Ед. измерения	Статический разлом	Микродинамический разлом
1	Годовой объем выпуска колец	тыс. шт.	1600	1600
2	Процент брака при разломе	%	10	1
3	Цена одного бракованного кольца	руб.	35	35
4	Дополнительные капитальные вложения	тыс. руб.	–	540
5	Годовой экономический эффект	тыс. руб.	–	4500

Как видно из таблицы 1, внедрение в производство только одного полуавтомата типа ПАРК обеспечивает годовой экономический эффект в сумме более 4,5 млн. руб., срок окупаемости капитальных вложений составляет менее 2 месяцев. Таким образом, эффективно решается задача повышения качества разлома деталей и уменьшения затрат на изготовление продукции.

Другим примером микроэнергетической технологии является микродинамическая релаксация остаточных напряжений. Остаточные напряжения неизбежно возникают при изготовлении изделий, в частности в процессе механической и термической обработки деталей. Поэтому на заключительной стадии изготовления деталей вводят операции стабилизации их геометрических параметров, правки и дополнительной механообработки.

На операции стабилизации геометрических параметров изделий чаще всего используют термический метод – низкотемпературный отпуск. Под действием нагрева колец подшипников до температуры 160-300°C и выдержки при этой температуре в течение 3-12 часов часть остаточных напряжений, возникших после предшествующей механической и термической обработки, устраняется, что стабилизирует геометрические параметры колец. Но при этом маложесткие заготовки подшипников теряют свою исходную форму – на заготовке может появиться овал, волнистость, отклонение от параллельности торцов, может изменяться размер. Поэтому после стабилизирующей термической операции вводят окончательную механическую обработку, что устраняет отмеченные погрешности.

Общими недостатками термического метода стабилизации изделий являются большие затраты энергии на нагрев деталей. Нагрев необходим для обеспечения деформации деталей, которая и устраняет остаточные напряжения. Но нагреву подвергается весь объем детали, а остаточные напряжения занимают лишь 3-8% его объема. Поэтому подавляющая часть энергии после выполнения операции улетучивается в пространство при охлаждении заготовки, оказывая вредное воздействие на экологию. Кроме того, тепловая энергия во многом теряется при преобразовании электрической энергии в тепловую, и при нагреве самой печи, и при отводе тепла через термозащиту печи. Поэтому коэффициент полезного действия процесса термического отпуска очень невелик. К числу недостатков указанной технологии относятся также низкая производительность, высокая стоимости оборудования, низкая стабильность получаемых геометрических параметров изделий. Кроме того, для осуществления операции термического отпуска надо остановить технологический процесс изготовления деталей, собрать заготовки в специальные контейнеры, а после обработки извлечь заготовки из контейнеров и доставить на рабочее место. Это дополнительно увеличивает затраты, в том числе затраты, связанные с незавершенным производством.

С целью устранения недостатков термического отпуска разработана технология микродинамической релаксации остаточных напряжений [8-13]. Сущность этой технологии заключается в том, что каждый участок заготовки подвергают периодической механической упругой деформации, в результате которой в силу эффекта упругого гистерезиса потенциальная энергия остаточных напряжений преобразовывается в энергию деформации деталей. Так как заготовка деформируется упруго, то в конце каждого цикла нагружению неиспользованная энергия упругой деформации возвращается в систему. Поэтому коэффициент полезного действия этой технологии приближается к 90-95%, что обеспечивает высокую энергоэффективность этого процесса.

Для реализации технологии термодинамической релаксации остаточных напряжений созданы различные виды оборудования [14,15]. Например, для релаксации остаточных напряжений деталей типа колец подшипников создан бесцентровый трехвалковый автомат, фотография которого приведена на рис. 3.

Автомат состоит из трех валков с перекрещивающимися осями с возможностью изменения угла скрещивания осей и привода, обеспечивающего возможность изменения частоты вращения валков. Оси двух валков выполнены неподвижными, а ось третьего валка имеет

регулировку в радиальном направлении с целью изменения расстояния между осями валков и обеспечения возможности обработки заготовок различного диаметра. Автомат имеет механизм радиального нагружения, позволяющий обеспечивать упругую деформацию заготовок на заданную величину.



Рис. 3. Фотография автомата для микродинамической релаксации остаточных напряжений колец подшипников

Производственные испытания автомата осуществлены совместно со специалистами подшипникового завода ОАО «ЕПК – Саратов». Были отобраны две партии колец подшипников Ш20.01 после операции предварительного шлифования по 24 заготовки в каждой партии, которые были замерены по основным геометрическим параметрам. Одна партия колец подшипников была подвергнута термоотпуску в воздушно-отпускных электропечах ОКБ-844, другая – с использованием указанного выше автомата. Сравнительные результаты испытания приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнительные показатели термической (ТО) и микродинамической (МДО) обработки

Метод стабилизации	Остаточные напряжения, МПа	Производительность, шт./час	Затраты энергии, кВт·час/1000шт	Цикл изготовления изделия, час
МДО	17	6670	0,27	$2,4 \cdot 10^{-3}$
ТО	30	1311	19	7,55

Из таблицы 2 видно, что микродинамическая стабилизация обеспечивает существенные преимущества по сравнению с термической стабилизацией:

- производительность обработки возрастает более чем в 5 раз;
- затраты энергии снижаются более чем в 70 раз;
- в сотни раз сокращается производственный цикл изготовления изделий, что снижает затраты на незавершенное производство более чем на 20%;
- почти в 2 раза снижается величина остаточных напряжений в деталях;
- в 3 раза уменьшается разброс значений остаточных напряжений в партии деталей;

– снижаются капитальные затраты, так как стоимость оборудования для микродинамической релаксации остаточных напряжений и стабилизации геометрических параметров изделий намного меньше стоимости электропечи в несколько раз.

– в отличие от термоотпуска, при котором погрешность формы заготовок возрастает, микродинамическая релаксация позволяет исправлять исходные погрешности формы заготовок.

На основе таких высоких показателей можно сделать заключение, что технология микродинамической релаксации остаточных напряжений и стабилизации геометрических параметров изделий относится к числу прорывных перспективных технологий машиностроительного производства.

Примером микротепловой технологии может служить технология лазерного дискретного упрочнения поверхности детали [16,17]. На рис. 4 показана схема математического моделирования теплового воздействия лазерного пятна нагрева поверхности заготовки на температуру в произвольной точке  $M(x, y, z)$ . Зона действия мгновенного источника тепла находится на плоской поверхности заготовки и показана в виде круга радиусом  $R$ . Вне зоны действия источника находится рассматриваемая т.  $M$ . Расстояние т.  $M$  от центра источника тепла равно  $r$ . Введем декартовую систему координат с центром, находящимся в центре  $O$  зоны нагрева. Ось  $Ox$  расположим в направлении движения источника тепла, ось  $Oy$  – в плоскости действия источника, ось  $Oz$  – перпендикулярно плоскости нагрева.

Теплота  $Q$  мгновенного источника тепла распределена равномерно в зоне нагрева. Выделим в зоне нагрева элементарную поверхность, расположенную на хорде  $AM$ , площадью  $S \cdot ds \cdot d\psi$ , где  $S$  – расстояние этой элементарной поверхности до т.  $M$ ,  $d\psi$  – угол охвата элементарной поверхности. Будем эту элементарную поверхность рассматривать, как точечный источник тепла. Угол расположения этого источника от линии  $OM$  равен  $\psi$ .

Температура в точке  $M(x, y, z)$  суммируется с учетом теплоотвода и закономерностей теплопередачи от температуры каждого элементарного участка  $S \cdot ds d\omega$  пятна лазерного нагрева радиусом  $R$ .

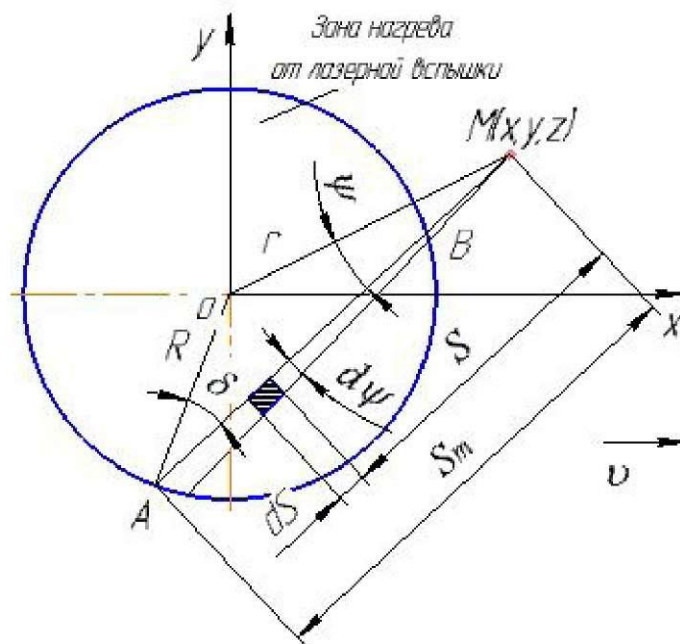


Рис. 4. Схема расчета температуры нагрева в произвольной точке  $M(x, y, z)$ , находящейся вне круговой зоне нагрева радиусом  $R$  от лазерной вспышки



Температура в т.  $M$  от точечного источника тепла  $dq = q_0 \cdot S \cdot ds \cdot d\psi$

$$d\theta = \frac{q \cdot S \cdot ds \cdot d\omega}{8 \cdot c \cdot \rho \cdot (\pi \cdot \alpha \cdot (\tau - t))^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{s^2 + z^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}\right).$$

где  $q_0$  – удельное количество тепла, выделенное источником лазерного излучения, Дж/м<sup>2</sup>;  $d\omega$  – угол охвата элементарной площадки, рад;  $ds$  – длина элементарной площадки, м;  $S$  – расстояние произвольной точки площадки нагрева ( $x_I, y_I$ ) до рассматриваемой точки  $M$ , м;  $t$  – начальный момент времени до возникновения источника тепла, с;  $\tau$  – текущий момент времени, с;  $\rho$  – плотность материала изделия, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг\*К);  $z$  – расстояние от поверхности, м.

Суммируя температуру в т.  $M$  от всех элементарных участков площадки нагрева, получим:

$$\theta = \theta_0 + \frac{q}{4 \cdot c \cdot \rho \cdot (\pi \cdot \alpha \cdot (\tau - t))^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}\right) \times \int_0^{\omega_m} d\omega \cdot \int_{s_{\min}}^{s_m} s \cdot \exp\left(-\frac{s^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}\right) ds. \quad (1)$$

После интегрирования равенства (1) определим:

$$\theta = \theta_0 + \frac{q}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \pi^{3/2} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau - t)}} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}\right) \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \delta}{\sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \delta}} \cdot \left( \exp\left(-\frac{s_{\min}^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}\right) - \exp\left(-\frac{s_m^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}\right) \right) d\delta, \quad (2)$$

где  $S_m = \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \delta} + R \cdot \cos \delta$ ;  $S_{\min} = \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \delta} - R \cdot \cos \delta$ .

Выражение (2) справедливо для точек, расположенных вне площадки нагрева. По аналогии получаем равенство для определения температуры произвольной точки поверхности, находящейся в зоне области нагрева:

$$\theta = \theta_0 + \frac{q_0}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \pi^{3/2} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau - t)}} \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}\right) \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \delta}{\sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \delta}} \cdot \left( 2 - \exp\left(-\frac{s_{\min}^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}\right) - \exp\left(-\frac{s_m^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}\right) \right) d\delta. \quad (3)$$

где  $S_m = \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \delta} + R \cdot \cos \delta$ ;  $S_{\min} = R \cdot \cos \delta - \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \delta}$ .

Суммарная температура в точке произвольной  $M$  от всех предыдущих лазерных вспышек будет зависеть от ее расстояния до центра каждой из этих вспышек и от времени с момента их возникновения. Так как т.  $M$  движется вдоль оси  $Ox$ , то ее расстояние от центра площадки нагрева постоянно изменяется. Сначала точка приближается к зоне вспышки, затем она попадает в зону вспышки, затем выходит из зоны вспышки и удаляется от нее. С увеличением расстояния от центра вспышки в точку  $M$  поступает меньшее количество тепла, а с возрастанием времени от момента вспышки из точки  $M$  отводится больше тепла.

Примем за начало отсчета числа вспышек, от которых поступает тепло в данную точку  $M$ , самую последнюю вспышку:  $t = 0$ . Тогда с учетом равенства (2) суммарная температура в точке  $M$  при приближении ее к зоне нагрева будет равна:

$$\theta_{x \leq -\sqrt{R^2 - y^2}} = \theta_0 + \frac{q}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \pi^{3/2} \cdot \sqrt{\alpha}} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\tau + i \cdot \lambda}} \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau + i \cdot \lambda)}\right) \times$$

$$\times \int_0^{\pi} \frac{\cos \delta}{\sqrt{\frac{(x - i \cdot \lambda \cdot v)^2}{R^2} - \sin^2 \delta}} \cdot \left( \begin{array}{l} \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{(x - i \cdot \lambda \cdot v)^2 + y^2 - R^2 \sin^2 \delta} + R \cdot \cos \delta\right)^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - i \cdot \lambda)}\right) - \\ - \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{(x - i \cdot \lambda \cdot v)^2 + y^2 - R^2 \sin^2 \delta} - R \cdot \cos \delta\right)^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - i \cdot \lambda)}\right) \end{array} \right) d\delta, \quad (4)$$

где  $i$  – номер предыдущей вспышки, начиная от самой последней;  $\lambda$  – промежуток времени между двумя последовательными вспышками, с;  $v$  – скорость перемещения заготовки вдоль оси  $Ox$ , м/с;  $\theta_0$  – температура окружающей среды, град.

Совершенно не обязательно суммирование производить до бесконечности. Так как тепло из точки нагрева быстро отводится, то достаточно принять за верхнее значение суммы число 3 или 4.

На основе равенств (2) и (3) определим температуру в точке, находящейся в зоне нагрева:

$$\theta_{-\sqrt{R^2 - y^2} < x \leq \sqrt{R^2 - y^2}} = \theta_0 + \frac{q}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \pi^{3/2} \cdot \sqrt{\alpha}} \cdot \left[ \sum_{i=i_m+1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\tau + i \cdot \lambda}} \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau + i \cdot \lambda)}\right) \times \right.$$

$$\left. \times \int_0^{\pi} \frac{\cos \delta}{\sqrt{\frac{(x - i \cdot \lambda \cdot v)^2}{R^2} - \sin^2 \delta}} \cdot \left( \begin{array}{l} \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{(x - i \cdot \lambda \cdot v)^2 + y^2 - R^2 \sin^2 \delta} + R \cdot \cos \delta\right)^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - i \cdot \lambda)}\right) - \\ - \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{(x - i \cdot \lambda \cdot v)^2 + y^2 - R^2 \sin^2 \delta} - R \cdot \cos \delta\right)^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - i \cdot \lambda)}\right) \end{array} \right) d\delta + \right. \quad (5)$$

$$+ \sum_{i=0}^{i_m} \frac{1}{\sqrt{(\tau+i \cdot \lambda)}} \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau+i \cdot \lambda)}\right) \times$$

$$\times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \delta}{\sqrt{\frac{(x-i \cdot \lambda \cdot v)^2}{R^2} - \sin^2 \delta}} \cdot \left[ \begin{array}{l} 2 - xp \left( -\frac{\left(\sqrt{(x-i \cdot \lambda \cdot v)^2 + y^2 - R^2 \sin^2 \delta} + R \cdot \cos \delta\right)^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau-i \cdot \lambda)} \right) - \\ - \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{(x-i \cdot \lambda \cdot v)^2 + y^2 - R^2 \sin^2 \delta} - R \cdot \cos \delta\right)^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau-i \cdot \lambda)}\right) \end{array} \right] d\delta,$$

где  $i_m$  – целое число лазерных вспышек, от которых получен тепловой заряд в точке  $M$  при ее перемещении в зоне нагрева:

$$i_m = \text{ceil} \frac{x + \sqrt{R^2 - y^2}}{\lambda \cdot v}$$

При выходе из зоны вспышки материал заготовки в точке  $M$  постепенно теряет температуру, но не резко, а плавно, так как она продолжает получать тепловые заряды из зоны вспышки. Суммарная температура в точке  $M$  после ее выхода из зоны нагрева будет равна:

$$\theta_{x > \sqrt{R^2 - y^2}} = \theta_0 + \frac{q}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \pi^{3/2} \cdot \sqrt{\alpha}} \cdot \left[ \sum_{i=0}^{i_z} \frac{1}{\sqrt{\tau+i \cdot \lambda}} \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau+i \cdot \lambda)}\right) \times \right.$$

$$\times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \delta}{\sqrt{\frac{(x-i \cdot \lambda \cdot v)^2}{R^2} - \sin^2 \delta}} \cdot \left[ \begin{array}{l} \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{(x-i \cdot \lambda \cdot v)^2 + y^2 - R^2 \sin^2 \delta} + R \cdot \cos \delta\right)^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau-i \cdot \lambda)}\right) - \\ - \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{(x-i \cdot \lambda \cdot v)^2 + y^2 - R^2 \sin^2 \delta} - R \cdot \cos \delta\right)^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau-i \cdot \lambda)}\right) \end{array} \right] d\delta + \quad (6)$$

$$+ \sum_{i=i_{vz}+1}^{i_{vz}+i_z} \frac{1}{\sqrt{(\tau+i \cdot \lambda)}} \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau+i \cdot \lambda)}\right) \times$$

$$\times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \delta}{\sqrt{\frac{(x-i \cdot \lambda \cdot v)^2}{R^2} - \sin^2 \delta}} \cdot \left[ \begin{array}{l} 2 - xp \left( -\frac{\left(\sqrt{(x-i \cdot \lambda \cdot v)^2 + y^2 - R^2 \sin^2 \delta} + R \cdot \cos \delta\right)^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau-i \cdot \lambda)} \right) - \\ - \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{(x-i \cdot \lambda \cdot v)^2 + y^2 - R^2 \sin^2 \delta} - R \cdot \cos \delta\right)^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau-i \cdot \lambda)}\right) \end{array} \right] d\delta,$$

где  $i_{vz}$  – ближайшее меньшее число лазерных вспышек при перемещении точки после зоны нагрева, равное:

$$i_{vz} = \text{ceil} \left( \frac{x - \sqrt{R^2 - y^2}}{\lambda \cdot v} \right);$$

$i_z$  – ближайшее меньшее целое число лазерных вспышек, которые произошли при перемещении точки  $M$  в зоне нагрева. равное:

$$i_z = \text{ceil} \left( \frac{2\sqrt{R^2 - y^2}}{\lambda v} \right).$$

Температурой, которая осталась в точке  $M$  от ее перемещения до зоны нагрева, пренебрегаем, так как она ничтожно мала по сравнению с температурой окружающей среды.

На основе выполненных исследований предложена микроэнергетическая технология лазерной закалки. Новизна предложенной технологии подтверждается патентом на изобретение [17]. В соответствии с этой технологией скорость перемещения обрабатываемой поверхности определяют по формуле:

$$v = k \cdot \frac{D_{pr}}{\lambda},$$

а шаг перемещения поверхности в поперечном направлении устанавливают равным:

$$l \leq 0,8 \cdot D_{pp},$$

где  $D_{pr}$  и  $D_{pp}$  – размеры зоны нагрева обрабатываемой поверхности при однократной лазерной вспышке соответственно вдоль ее перемещения и в поперечном направлениях,  $m$ ;  $\lambda$  – время между двумя лазерными вспышками,  $c$ ;  $k$  – коэффициент перекрытия зоны нагрева – величина, обратная числу лазерных вспышек за время перемещения произвольного участка обрабатываемой поверхности через зону лазерного воздействия, определяемый в зависимости от интенсивности лазерного излучения и от требуемого режима теплового воздействия:  $k = 0,2 - 0,5$ .

На рис. 5 в качестве примера представлена зависимость температуры, соответствующей (4-6), от положения рассматриваемой точки относительно центра зоны нагрева при ее перемещении вдоль центральной оси  $Ox$ .

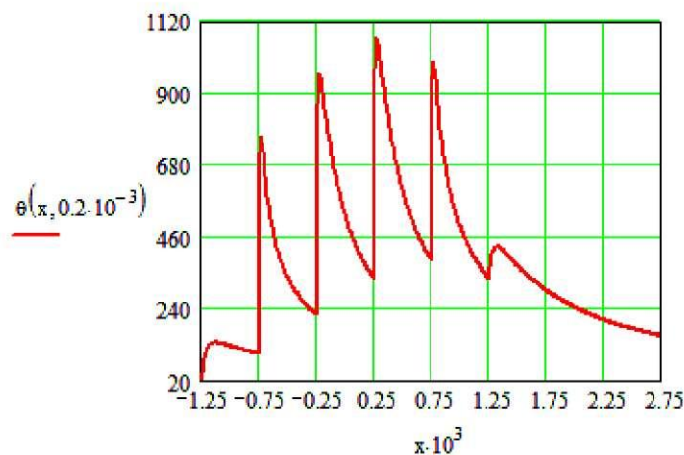


Рис. 5. Распределение температуры  $\theta(x, z)$  ( $^{\circ}C$ ) на глубине  $z = 0,2$  мм от обрабатываемой поверхности при ее перемещении относительно зоны лазерного нагрева

Расчеты выполнены для следующих условий. Радиус нагрева поверхности от лазерной вспышки  $R = 1$  мм, такт лазерных вспышек  $\lambda = 0,05$  с, скорость перемещения заготовки относительно зоны нагрева  $\nu = 0,01$  м/с, интенсивность лазерного излучения  $q = 4,8$  Дж/мм<sup>2</sup>, точка находится на оси  $Ox$  ( $y = 0$ ). За начало отсчета положения рассматриваемой точки принят центр зоны лазерного нагрева  $x = 0$  мм.

Интервал перемещения рассматриваемой точки на обрабатываемой поверхности между двумя последовательными лазерными вспышками равен  $\Delta x = \lambda \cdot \nu = 0,5$  мм. Первое положение точки, при которой проявляется действие лазерной вспышки,  $x = -1,25$  мм. Так как радиус зоны нагрева  $R = 1$  мм, то, следовательно, рассматриваемая точка в этот момент находится за пределами зоны нагрева. При дальнейшем перемещении рассматриваемой точки до следующей лазерной вспышки ее температура плавно повышается до  $120^\circ$ , а затем падает. При последующих четырех лазерных вспышках рассматриваемая точка находится в зоне нагрева. При каждой такой вспышке ее температура резко возрастает до температуры закалки, а затем резко падает. Как известно, многоцикловая закалка обеспечивает образование благоприятной мелкодисперсной структуры металла, а ее падение до  $300-400^\circ$  ограничивает образование остаточных напряжений.

После выхода рассматриваемой точки за пределы зоны нагрева ее температура сначала падает, а затем при очередной лазерной вспышке при  $x = 1,25$  мм, ее температура повышается. Тем самым обеспечивается задержка резкого падения температуры. На сравнительно большом участке перемещения рассматриваемой точки от  $x = 1,75$  мм до  $x = 3,5$  мм температура находится в зоне низкотемпературного отпуска, что способствует удалению остаточных напряжений.

### ВЫВОДЫ

Разработанный метод позволяет повысить качество изделий, так как лазерная закалка осуществляется в несколько циклов, что улучшает структуру материала, а отпуск поверхности после закалки растянут по времени, и поэтому обеспечивает активное удаление напряжений после закалки. Кроме того, расширяются технологические возможности лазерной обработки, так как ее можно использовать вместо других применяемых в настоящее время и малоэффективных технологий изготовления маложестких деталей.

Помимо приведенных выше в качестве примера технологий разработаны многие другие, основанные на применении принципа микроэнергетического воздействия инструмента на изготавливаемое изделие.

К ним относятся многопереходная осуществляемая на проход холодная микрораскатка деталей из труднообрабатываемых материалов, многобрусковая суперфинишная обработка, вибрационная правка шлифовальных кругов, технология создания твердых антифрикционных покрытий, технология ультразвукового выглаживания закаленных поверхностей деталей, технология программного стохастического комплектования изделий с локализацией объема комплектуемых деталей и другие. Развитие указанного научного направления позволяет существенно повысить эффективность машиностроительного производства, его конкурентную способность, улучшить условия труда, повысить престиж отечественной науки в области технологии машиностроения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев А.В., Чистяков А.М. Энергетические критерии эффективности технологических процессов. Прогрессивные направления развития технологии машиностроения. Межвуз. науч. сб. СГТУ, Саратов, 1998. С. 25-33.

2. Королев А.В. Вероятностные основы разрушения материалов. Доклады Российской Академии Естественных Наук. №1. 1999 г. С. 194-201.
3. Королев А.В., Королев А.А., Тюрин А.Н., Чистяков А.М. Технологические методы в машиностроении, основанные на реализации концепции локализации технологической энергии. Уральск. Из-во Westa. 2019. 240 с.
4. Королев А.В., Чистяков А.М., Болкунов В.В. Новые прогрессивные технологии машиностроительного производства. Часть 6. Энергосберегающая технология безотходного разделения изделий на основе локально направленного разлома. Саратов, Сарат. Гос. Техн. ун-т. 1998 – 124 с.
5. Korolev A.V., Bolkunov V.V., Korolev A.A. Waste-Free Splitting. Russian Engineering Research. – 2009 – Vol. 29. №12-P 1258-1260.
6. Korolev A.V., Filimonov E.V., Bolkunov V.V., Korolev A.A. Waste-free manufacture of shaped rollers. Russian Engineering Research. – 2009 – Vol. 29. №11-P 1140-1144.
7. RU № 2103119. Способ разлома деталей // Королев А.В., Чистяков А.М., Кривега В.А. Моисеев В.Г. Бюл. № 3, 27.01.98.
8. Korolev A.V., Yakovishin A.S., Korolev A.A., etc. Geometric stabilization of bearing races by centerless rolling. 2017, Russian Engineering Research 37 (1), с. 79-81.
9. Korolev A.V., Korolev A.A., Balaev A.F., etc. Experimental study of residual stresses relaxation in ring details during multicyclic loading. 2016 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 156 (1), 012011.
10. Korolev A.V., Yakovishin A.S., Korolev A.A., etc. Increasing durability of bearings by the application of technological operations on the basis of cyclic elastic deformation of the rings. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 286 (2017) 012002.
11. Korolev A.V., Balaev, A.F., Iznairov B.M. Relaxation of Residual Stresses in Bearing Rings Based on the Optimal Geometric Setup of Equipment for Centerless Running. Materials Science Forum Submitted: 2018-04-05 ISSN: 1662-9752, Vol. 973, pp 183-188 Accepted: 2019-02-26. © 2019 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland Online: 2019-11-20.
12. RU 2617073. Способ стабилизации неометрических параметров деталей // Королев А.В., Королев А.А., Балтаев Т.А. Бюл. № 11. 19.04.2017.
13. RU 2611614. Способ правки и стабилизации нежестких деталей // Королев А.В., Королев А.А. Бюл. 7. 28.02.2017.
14. RU 2608115. Бесцентровый станок для обкатки и стабилизации кольцевых деталей // Королев А.В., Королев А.А. Бюл. № 2 13.01.2017.
15. RU 2611615. Установка для раскатки и стабилизации дорожек качения шариковых подшипников // Королев А.В., Королев А.А. Бюл. № 7. 28.02.2017.
16. Korolev, A.V., Korolev A.A., Zhuravlyov M.M. The Mechanism of hardening and internal stress stabilisation in the process of laser treatment. Journal of Russian Laser Research, Volume 36, Number 4, July, 2015. С. 15-16 – DOI 10.1007 / s10946-015-9510-3.
17. RU 2581691. Способ поверхностного упрочнения и стабилизации мало жестких изделий / Королев А.В., Королев А.А., Курзанова Т.А., Журавлев М.М. Оpubл. 20.04.2016. Был. 11.

#### LIST OF REFERENCES

1. Korolev A.V., Chistyakov A.M. Energy criteria for the effectiveness of technological processes. Progressive directions in the development of engineering technology. Interuniversity.science SSTU, Saratov, 1998. S. 25-33.
2. Korolev A.V. The probabilistic basis for the destruction of materials. Reports of the Russian Academy of Natural Sciences. № 1. 1999 S. 194-201.

3. Korolev A.V., Korolev A.A., Tyurin A.N., Chistyakov A.M. Technological methods in engineering, based on the implementation of the concept of localization of technological energy. Uralsk. Publisher Westa. 2019. 240 с.

4. Korolev A.V., Chistyakov A.M., Bolkunov V.V. New progressive technologies of machine-building production. Part 6. Energy-saving technology for non-waste product separation based on locally directed fault. Saratov, Sarat. Gos. Tech. un-t 1998 – 124 s.

5. Korolev A.V., Bolkunov V.V., Korolev A.A. Waste-Free Splitting. Russian Engineering Research. – 2009 – Vol. 29. No. 12 – P 1258-1260.

6. Korolev A.V., Filomonov E.V., Bolkunov V.V., Korolev A.A. Waste-free manufacture of shaped rollers. Russian Engineering Research. – 2009 – Vol. 29. No. 11 – P 1140-1144.

7. RU No. 2103119. Method for breaking parts // Korolev A.V., Chistyakov A.M., Krivega V.A. Moiseev V.G. Bull. No. 3, 01/27/98.

8. Korolev A.V., Yakovishin A.S., Korolev A.A., etc. Geometric stabilization of bearing races by centerless rolling. 2017, Russian Engineering Research 37 (1), p. 79-81.

9. Korolev A.V., Korolev A.A., Balaev A.F., etc. Experimental study of residual stresses relaxation in ring details during multicyclic loading. 2016 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 156 (1), 012011.

10. Korolev A.V., Yakovishin A.S., Korolev A.A., etc. Increasing durability of bearings by the application of technological operations on the basis of cyclic elastic deformation of the rings. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 286 (2017) 012002.

11. Korolev A.V., Balaev A.F., Iznaïrov B.M. Relaxation of Residual Stresses in Bearing Rings Based on the Optimal Geometric Setup of Equipment for Centerless Running. Materials Science Forum Submitted: 2018-04-05 ISSN: 1662-9752, Vol. 973, pp 183-188 Accepted: 2019-02-26. © 2019 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland Online: 2019-11-20.

12. RU 2617073. The method of stabilization of non-geometric parameters of parts // Korolev A.V., Korolev A.A., Baltaev T.A. Bull. No. 11. 04/19/2017.

13. RU 2611614. The method of editing and stabilization of non-rigid parts // Korolev A.V., Korolev A.A. Bull. 07.28.2017.

14. RU 2608115. Centerless machine for running-in and stabilization of ring parts // Korolev A.V., Korolev A.A. Bull. No. 2 01/13/2017.

15. RU 2611615. Installation for rolling and stabilization of raceways of ball bearings // Korolev A.V., Korolev A.A. Bull. No. 7. 02.28.2017.

16. Korolev A.V., Korolev A.A., Zhuravlyov M.M. The Mechanism of hardening and internal stress stabilization in the process of laser treatment. Journal of Russian Laser Research, Volume 36, Number 4, July, 2015. S. 15-16 – DOI 10.1007 / s10946-015-9510-3.

17. RU 2581691. Method of surface hardening and stabilization of low-hard products / Korolev A.V., Korolev A.A., Kurzanova T.A., Zhuravlev M.M. Publ. 04/20/2016. It was. eleven.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Королев Альберт Викторович** –  
доктор технических наук, профессор  
Саратовского государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.

**Albert V. Korolev** –  
Dr. Sc. (Engineering), Professor, Department of  
Control Systems Technology in Mechanical  
Engineering, Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

**Королев Андрей Альбертович** –  
доктор технических наук, профессор, Сара-  
товский государственный технический уни-  
верситет имени Гагарина Ю.А

**Andrey A. Korolev** –  
Dr. Sc. (Engineering), Professor, Department of  
Control Systems Technology in Mechanical  
Engineering, Yuri Gagarin State Technical Uni-  
versity of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.02.20, принята к опубликованию 15.03.20*

**Т.Г. Насад, К.Т. Шеров, И.П. Насад**

## **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*Аннотация.* В статье проанализированы теплофизические процессы при гибридной обработке. Рассмотрены вопросы схематизации контактирующих тел и тепловых источников, действующих на инструменте, детали, плоскости сдвига и их взаимодействие. Разработана теплофизическая модель, предложено решение задачи баланса теплоты.

*Ключевые слова:* температура, режимы резания, теплофизика процесса, источник теплоты, конвективный теплообмен, энергия, гибридные технологии, многолезвийная обработка

**T.G. Nasad, K.T. Sherov, I.P. Nasad**

## **THERMOPHYSICAL ASPECTS OF HYBRID TECHNOLOGIES**

*Abstract.* The provided analysis relates thermophysical processes in hybrid processing. The challenges concerned with mapping contacting bodies and thermal sources acting over tools, parts, shear areas and their relationship are considered. The designed thermophysical model can be applied to solve the problems of heat-transfer balance.

*Keywords:* temperature, cutting modes, thermophysics, heat source, convection heat transfer, power, hybrid technologies, multiblade processing

### **ВВЕДЕНИЕ**

В машиностроительной отрасли требования к качеству и точности изделий неуклонно возрастает. Традиционные методы обработки, которые используются на производстве, часто не дают ожидаемого эффекта. В то же время активно развиваются направления по повышению качества и эффективности механической обработки за счёт циклического снижения прочности материала заготовок. Для реализации циклического снижения прочности обрабатываемого материала, наиболее целесообразно применять гибридную обработку (ГО), сочетающую механическую с другими видами энергии – химической, тепловой, электромагнитной, электрической, и позволяющую обеспечивать качественно новый комплекс характеристик изделий машиностроения.

Гибридная технология, реализованная на специальном оборудовании с ЧПУ способствует:

- Снижению расхода энергии.
- Облегчению процесса формообразования.
- Повышению производительности.
- Обеспечению высокого качества поверхности.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

В процессе гибридного формообразования в зоне резания возникают три основных источника теплоты:

- теплота деформации в зоне стружкообразования  $q_d$ ;



– теплота трения на контактной площадке между стружкой и передней поверхностью инструмента  $q_{1T}$ ;

– теплота трения между задней поверхностью инструмента и деталью  $q_{2T}$ .

В отдельных случаях (например, использования предварительного нагрева или охлаждения) должен учитываться дополнительный источник или сток теплоты.

Все источники тепловыделения при резании являются объемными, но с увеличением скорости резания, теплота не успевает глубоко проникнуть в поверхность заготовки, поэтому при теплофизическом анализе их полагают двумерными или одномерными.

Общую мощность тепловыделения при ГО полагают эквивалентной механической работе деформирования и работе сил трения на контактных площадках инструмента с деталью и стружкой, т.е.  $W = P_z V$ , где  $P_z$  – главная составляющая силы резания, Н;  $V$  – скорость резания, м/с.

С учетом предварительного нагрева можно записать:

$$W^+ = W_{д^+} + W_{1T^+} + W_{2T^+} + W_{теп^+} \quad (1)$$

где  $W_{д^+}$ ,  $W_{1T^+}$ ,  $W_{2T^+}$  – соответственно мощности тепловыделения источников, возникающих в процессе обработки в области плоскости сдвига, на передней и задней поверхности инструмента;  $W_{теп^+}$  – мощность дополнительного источника теплоты. Знак «+» свидетельствует о рассмотрении процесса резания с предварительным нагревом.

Сформируем систему уравнений, описывающую баланс теплоты между контактирующими телами:

$$\begin{cases} W^+ = W_c^- + W_n^- + W_p^- = P_{z1}^- (\Theta) V \\ W_c^- = b^* W_{д^+} + W_{1T^+} - W_1^- \\ W_n^- = (1 - b^*) W_{д^+} + W_{2T^+} - W_2^- \\ W_p^- = W_1^- + W_2^- \end{cases} \quad (2)$$

где  $W_c^-$ ,  $W_n^-$ ,  $W_p^-$  – соответственно теплота в стружке, изделии и резце;  $b^*$  – доля, характеризующая часть теплоты деформации, передаваемая стружке;  $W_1^-$ ,  $W_2^-$  – тепловая мощность итоговых потоков теплоты.

Мощность теплообразующих источников равна [5]:

$$W_{д^+} = (P_{z1} - F_2) V - F_1 V_1 \quad (3)$$

$$W_{1T^+} = F_1 V; \quad W_{2T^+} = F_2 V \quad (4)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – силы трения на контактных поверхностях инструмента [1,5],  $V_1$  – скорость перемещения стружки, м/с,  $V$  – скорость резания, м/с.

В структурной схеме теплообмена ГО стружка, образующаяся при резании, в большинстве случаев представляет собой элементную, поэтому в модели она представлена в виде бесконечного стержня. Источник  $q_{1T}$ , возникающий на плоскости сдвига ON, принят распределенным равномерно. Двигается внутри стержня (стружки), располагаясь наклонно к оси последнего. Угол  $\mu = \Phi - \gamma$  имеет значения ( $\mu \approx 10 \dots 15^\circ$ ). Максимальная плотность тепловыделения может быть рассчитана из соотношения:

$$q_{д^+} = W_{д^+} \frac{\sin \Phi}{ab} \quad (5)$$

где  $a$  – толщина среза, мм;  $b$  – ширина среза, мм,  $\Phi$  – угол наклона плоскости сдвига.

Угол наклона плоскости сдвига [5]:

$$\sin \Phi = \frac{\cos \gamma}{(\sqrt{k^2 - 2k \sin \gamma} + 1)} \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент усадки стружки.

По отношению к стружке температурное поле от источника теплоты, действующего на плоскости сдвига, описывается выражением:

$$\Theta \approx \frac{q\omega}{\lambda V_1} \quad (7)$$

Выражение действительно для точек расположенных позади источника, так как считается, что впереди быстро движущегося источника температурное поле не распространяется [5]. Для расчета температуры деформации может быть использовано выражение, учитывающее характерные особенности теплообразования при ГО.

Деталь схематизируем полупространством (нижняя граница – пассивна), на поверхности которого действует быстро движущийся плоский тепловой источник. Установлены граничные условия второго рода. По отношению к детали на поверхности полупространства действует двумерный быстро движущегося тепловой источник.

В пределах контактной площадки ( $x \leq l$ ;  $y = 0$ )

$$\Theta_{2T}^{\max}(x,0) = \frac{2q_{2T} \sqrt{\omega l_2}}{\lambda \sqrt{\pi V_1}} \sqrt{\Psi} \quad (8)$$

$$\bar{\Theta}_{2T} = \frac{2q \sqrt{\omega l_2}}{\lambda \sqrt{\pi V_1}} K_c L_c \quad (9)$$

где  $\Psi = x/l$ .

За пределами контакта ( $x \geq l$ ;  $y = 0$ ), температура нагрева равна:

$$\Theta_{2T}^{\max} = \frac{2q_{2T} \sqrt{\omega l_2}}{\lambda \sqrt{\pi V_1}} (\sqrt{\Psi} - \sqrt{\Psi - 1}) \quad (10)$$

Рассматривая площадь сдвига как поверхность соприкосновения стержня (стружки) и полупространства (детали), определим долю теплоты, направляемой в стружку. Наиболее достоверные результаты дает зависимость с учетом температурно-скоростного фактора по формуле:

$$l = \frac{\tau_\beta 4ab(\sin \omega + \gamma)}{\tau_F (b_1 + 3b'_1) \sin \Phi \cos(\omega + \Phi)}$$

где  $a$ ,  $b$  – соответственно толщина и ширина срезаемого слоя, мм;  $b_1$ , и  $b'_1$  – ширина стружки и уширение прирезцового слоя в связи с его пластическим деформированием;  $\beta$ ,  $\omega$ ,  $\gamma$  – условный угол сдвига, угол действия, угол схода стружки;  $\tau_\beta$ ,  $\tau_F$  – средние значения касательных напряжений, отнесенные к условной плоскости сдвига и номинальной поверхности контакта стружки с инструментом.

Используя схематизацию процесса и источников можно записать:

$$\Theta_c(x,0) = (1+c)\Theta_d + \Theta_{1T}(x,0) - \Theta_1(x,0)$$

где  $x,0$  – координаты точки;  $\Theta_d$ ,  $\Theta_{1T}$  – повышение температуры, вызванное теплотой деформации и теплотой трения;  $\Theta_1(x,0)$  – снижение температуры, в результате теплообмена стружки с резцом;  $c$  – коэффициент учитывающий подогрев поверхностных слоев материала, из которых образуется стружка. Для обычного резания  $c = 0,05 \dots 0,15$ . В условиях с дополнительным тепловым воздействием рекомендуют принимать  $c = 1,2 \dots 1,3$  [2,5].

При решении теплофизической задачи рассмотрен случай обработки с использованием искусственного охлаждения зоны резания передней и задней поверхностей режущего инструмента потоками СОТС.

$$\Theta_o = \Theta - \Theta_c - \Theta_T \quad (11)$$

В данной формуле  $\Theta_o$  – температура рассматриваемого участка зоны резания,  $\Theta$  – температура того же участка без охлаждения, вызванного подачей СОТС. Величина  $\Theta_c$  характеризует собой снижение температуры, которое вызвано улучшением смазки трущихся поверхностей при применении смазочно-охлаждающей жидкости. Величина  $\Theta_T$  характеризует влияние теплоотвода в охлаждающую среду с нагретых поверхностей инструмента, стружки и изделия.

Для случая охлаждения режущего инструмента при подаче СОТС на переднюю и заднюю поверхности режущего клина одновременно можно использовать формулы, описывающие средние температуры на контактных поверхностях режущего инструмента:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_1 &= \frac{M_1}{\lambda_\delta} (q_1 + q_{01}) l_1 + \frac{N_2}{\lambda_\delta} (q_2 + q_{02}) l_2 - \frac{M_{01}}{\lambda_\delta} q_{01} l_{01} - \frac{N_{02}}{\lambda_\delta} q_{02} l_{02} \\ \bar{\Theta}_2 &= \frac{M_2}{\lambda_\delta} (q_2 + q_{02}) l_2 + \frac{N_1}{\lambda_\delta} (q_1 + q_{01}) l_1 - \frac{M_{02}}{\lambda_\delta} q_{02} l_{02} - \frac{N_{01}}{\lambda_\delta} q_{01} l_{01} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $q_{01}$ ,  $q_{02}$  – интенсивности стоков тепла по передней и задней поверхностям, Вт/м<sup>2</sup>;  $M_{01}$ ,  $M_{02}$ ,  $N_{01}$ ,  $N_{02}$  – функции, учитывающие взаимный нагрев площадок;  $l_{01}$ ,  $l_{02}$  – размеры пятна, занимаемого на передней и задней поверхностях стоком тепла, м.

Применение охлаждения инструмента потоками СОТС приводит к снижению температуры на 8-10% [2-3].

В случае прерывистого резания с регулярно повторяющимися циклами для величины  $M_1$  вводят поправки  $\chi_p$  и  $\chi_x$  для рабочего и холостого ходов соответственно.

$$\left. \begin{aligned} M_{1p} &= M_1 \chi_p \\ M_{1x} &= M_1 \chi_x \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Полученные значения  $M_{1p}$  и  $M_{1x}$  подставляются в формулу (12) для определения средней температуры на передней поверхности инструмента в конце рабочего хода  $\Theta_p$  и в конце холостого  $\Theta_x$  соответственно.

Значения поправок зависят от безразмерного критерия Фурье и коэффициента  $\varepsilon = \tau_x / \tau_p$  ( $\tau_x$  – длительность холостого хода, с;  $\tau_p$  – длительность рабочего хода, с) и могут быть определены из графика.

$$Fo_p = \frac{100 \omega_p \tau_p}{l_1^2} \quad (14)$$

где  $\omega_p$  – коэффициент температуропроводности режущего материала, м<sup>2</sup>/с.

Полученная теплофизическая модель также учитывает многолезвийность обработки. Суммарное повышение температуры для  $m$ -го зуба можно определить:

$$\Delta \Theta_m = \frac{1,13 q_2 \sqrt{\omega}}{\lambda b \sqrt{V(\frac{t}{tg\Phi} + 1_2)}} \tau_1 \left( \frac{t_0}{(\frac{t}{tg\Phi} + 1_2)^2}; 0,25 \frac{V(\frac{t}{tg\Phi} + 1_2)}{\omega} \right) \frac{(\sqrt{\varphi} - \sqrt{\varphi - 1}) [1 - (\sqrt{\varphi} - \sqrt{\varphi - 1})^m]}{1 - (\sqrt{\varphi} - \sqrt{\varphi - 1})} \quad (15)$$

где  $\varphi \approx t_0 / l$  – безразмерный шаг между зубьями инструмента;  $\Phi$  – угол сдвига, °.

## ВЫВОДЫ

Моделирование на ЭВМ позволило установить, что многолезвийность обработки способствует повышению температуры в зоне резания на 4-5%.

Предложенный комплекс теплофизических моделей позволяет теоретическим путём определять температурные поля в контактирующих телах, рассчитывать баланс теплоты с учётом конвективного теплообмена и многолезвийности обработки и управлять процессом тепловыделения для обеспечения роста показателей качества поверхностного слоя в процессе формообразования при ГО.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогов В.А. Методика и практика технических экспериментов / В.А. Рогов, Г.Г. Позняк. М.: Издательский центр «Академия», 2005. С. 288.
2. Насад Т.Г., Васин А.Н., Казинский А.А., Игнатьев А.А., Изнаиров Б.М., Козлов Г.А., Тихонов Д.А., Самойлова Е.М., Решетникова О.П., Глушкова Ю.О., Давиденко О.Ю., Мелентьев В.А. Управление качеством поверхности деталей машиностроения // СТИН. 2018. Вып. № 7. С. 30-32.
3. Surface-layer quality after high-speed turning of hard material Kiryushin I.E., Kiryushin D.E., Venig S.B., Nasad T.G., Stepanova M.O., Terin D.V. Russian Engineering Research. 2014. Т. 34. № 6. С. 423-424.
4. Benefits of high-speed milling Kiryushin I.E., Kiryushin D.E., Nasad T.G., Venig S.B. Russian Engineering Research. 2012. Т. 32. № 1. С. 48-49.
5. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с. – ISBN 5-217-01013-4

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Насад Татьяна Геннадиевна** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и управление в машиностроении Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Шеров Карибек Тагаевич** – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология машиностроения» Карагандинского государственного технического университета (Казахстан)

**Насад Ирина Павловна** – аспирант кафедры «Технологии и управление в машиностроении Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Tatyana G. Nasad** – Dr. Sc. (Engineering), Professor, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Karibek T. Sherov** – Dr. Sc. (Engineering), Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Karaganda State Technical University (Kazakhstan)

**Irina P. Nasad** – Postgraduate Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov  
irisha350oe@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 20.02.20, принята к опубликованию 15.03.20*

**А.В. Панфилова**

## **ЭВОЛЮЦИЯ РАЗРАБОТКИ СПОСОБА УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ**

***Аннотация.** Рассматривается творческий поиск нового подхода к проблеме удаления окалины с металлических поверхностей и процесс разработки нового способа решения этой проблемы профессорами кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» СГТУ имени Гагарина Ю.А. Королевым А.В. и Королевым А.А. Показаны промежуточные и окончательные результаты удаления окалины с поверхностей образцов различными способами.*

***Ключевые слова:** окалина, способ, устройство, модернизация, окалиноломатель, экспериментальные исследования*

**A.V. Panfilova**

## **EVOLUTION OF DESCALING METHODOLOGY**

***Abstract.** A creative search for an advanced approach to the challenges related with descaling metal surfaces, and the process of designing new ways to solving the problem by professors A.V. Korolev and A.A. Korolev at the Department of Technologies and Control Systems in Mechanical Engineering of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov are reported. The focus is made on the intermediate and end results of descaling sample surfaces using various techniques.*

***Keywords:** scale, method, device, modernization, scale breaker, field research*

### **ВВЕДЕНИЕ**

На поверхности изделий, получаемых путем горячей прокатки, присутствует железная окалина. Окалина – это смесь оксидов железа, образующаяся при взаимодействии кислорода с раскалённым металлом. Она состоит из  $Fe_3O_4$ ,  $FeO$  и  $Fe_2O_3$  – магнетита, вьюстита и гематита, соответственно, и представлена отделяемыми друг от друга слоями. Толщина каждого из трёх слоёв зависит от температуры обработки стали. Так, при превышении порога в  $570^\circ C$  образуется чётко выраженная трёхслойная структура окалины. Дальнейшее повышение температуры ведёт к увеличению толщины вьюстита. Если же сталь обрабатывается при температурах ниже  $570^\circ C$ , то в составе окалины преобладают магнетит и гематит. Окалина значительно сокращает коррозионную стойкость материала и усложняет последующую обработку, поэтому необходимо полное ее удаление.

Известно, что после правки металлических листов на листопрямильных машинах значительная часть находящейся на поверхности листов окалины будет отслаиваться и осыпаться, а незначительная часть останется на листах в рыхлом состоянии. Исследования, проведенные на Донецком металлургическом заводе показали, что после деформации листов различных размеров на поверхности листов остается от 6% до 12% рыхлой окалины. Кроме того проведенные исследования, которые осуществлялись на образцах с рыхлой окалиной, показали, что эта окалина поддается эффективному удалению механическим способом простыми средствами. Были разработаны способ и устройство для удаления такой окалины и проведены экспериментальные исследования по удалению окалины. Для проведения эксперимен-

тальных исследований были использованы образцы, вырезанные из листов, не подвергнутых предварительной правке. Поэтому они имели «девственную» окалину, прочно удерживаемую на поверхности образцов и покрывающую от 40% до 80% этой поверхности. В качестве образцов при проведении экспериментальных исследований использовались прямоугольные пластины размером 100 x 200 мм, вырезанные газовой резкой из листов Ст3сп ГОСТ 14637-89 толщиной 16 мм.

Выполненный литературный и патентный поиск способов и устройств, предлагаемых для удаления окалины, показал, что в промышленности в настоящее время для удаления окалины применяют очень сложные в эксплуатации способы, которые возможно использовать лишь крупным металлургическим предприятиям. Тем более отсутствуют способы, которые позволяли бы совмещать удаление окалины с правкой проката на листопрямильной машине.

Предложен оригинальный механический способ удаления окалины цилиндрическим роликом, имеющим шипы на рабочей поверхности, играющих роль окалиноломателей. Сущность способа заключается в том, что ось ролика располагают в плоскости, параллельной плоскости обрабатываемой поверхности, ролик прижимают к этой поверхности и вращают вокруг вертикальной оси, перпендикулярной плоскости обрабатываемой поверхности. В процессе вращения вокруг вертикальной оси ролик под действием сил трения вращается вокруг своей оси и шипами, находящимися на своей рабочей поверхности, разрушает окалину.

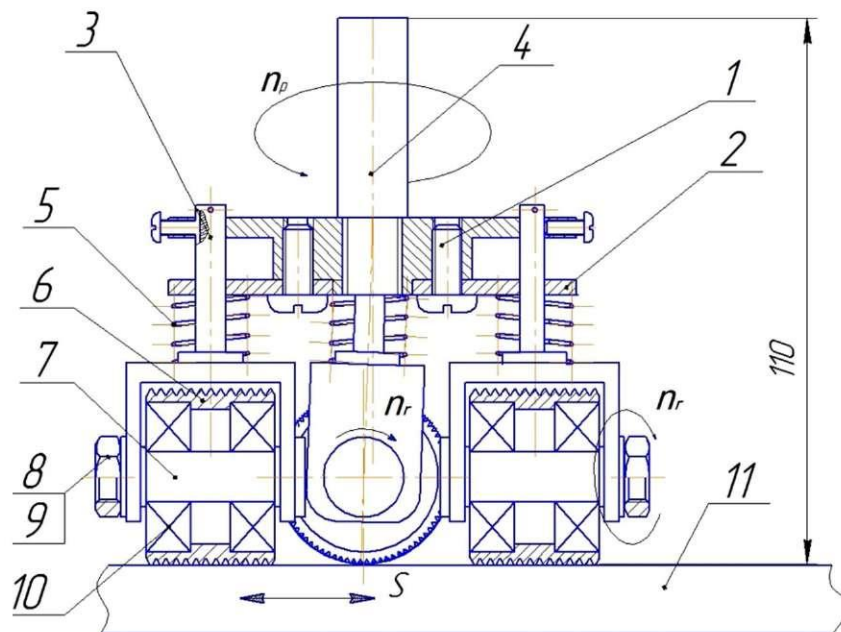


Рис. 1. Схема осуществления способа удаления окалины

Ролики с шипами 6 установлены в подшипниках 10 на оси 7, расположенной в радиальном направлении устройства. Ось 7 закреплена в специальной державке 3, установленной в корпусе 1 приспособления с возможностью перемещаться под действием пружины 5 вдоль своей оси. В приспособлении могут устанавливаться различное число роликов 2, 3, 4, 6 и т.д.

Обработку осуществляют следующим образом. Корпус 1 устанавливают над обрабатываемой поверхностью заготовки 11 так, что ролики 6 под действием пружины 5 прижимаются к обрабатываемой поверхности с определенным усилием. Включают вращение корпуса приспособления вокруг своей оси с частотой  $n_p$ , а заготовку перемещают вдоль стола станка (в направлении главного вида). Кроме того корпусу 1 приспособления придают перемещение со скоростью  $S$  в поперечном направлении к направлению перемещения заготовки.

Под действием сил трения с поверхностью заготовки ролики  $b$  получают вращение вокруг своих осей и осуществляют чистое качение по обрабатываемой поверхности. Своими шипами, расположенными на наружной поверхности, ролики взаимодействуют с окалиной и разрушают ее. Помимо этого с поверхности заготовки удаляется ржавчина. Этому способствует наличие небольшого проскальзывания поверхности роликов относительно обрабатываемой поверхности, которое возникает из-за наличия движения заготовки.

Исследования показали, что при наличии острых шипов на поверхности ролик эффективно разрушает окалину при прокатке его над ее поверхностью. Однако ролик при такой схеме работал только своей боковой кромкой и поэтому оставлял следы на обрабатываемой поверхности (рис. 3).



Рис. 2. Фотография ролика с шипами



Рис. 3. Фрагмент разрушенной окалины

Поэтому предложенный способ был модернизирован следующим образом. На рабочей поверхности роликов  $b$  вместо шипов была выполнена винтовая поверхность, которая не оставляет следы на обрабатываемой поверхности, а ось  $7$  вращения роликов  $b$  была установлена под углом  $\alpha$  к радиальному направлению устройства. При развороте ролика на угол  $\alpha$  появляется составляющая силы трения, направленная по касательной к окружности вращения и осуществляющая сдвиг окалины при взаимодействии с ней рабочей поверхности ролика. Предварительные испытания предложенного способа показали положительные результаты. На рис. 4, например, показаны фотографии образцов до и после обработки. Как видно, с поверхности заготовки была удалена не только окалина, но и ржавчина. Обработанная поверхность после обработки имеет ровный матовый блеск.

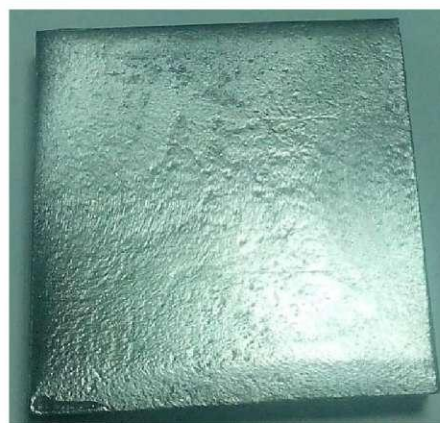


Рис. 4. Фотографии поверхности образца до и после обработки

Недостатком этого способа является то, что на ролик *б*, на его подшипниковую опору *10* и на державку *3* действует повышенная нагрузка. Поэтому державка *3* быстро приходит в негодность (рис. 5).



Рис. 5. Фотографии инструмента после выполнения опытов

В связи с этим было принято решение использовать для удаления окалины более жесткий и более простой конструктивно инструмент в виде торцового ролика (рис. 6). Предложено устройство для удаления окалины содержит ролики *1*, имеющие рабочую поверхность на их торце, корпус *2*, оправку *3*, гайку *4* для крепления устройства на станке и пружины *5* для поджима ролика к обрабатываемой поверхности. На торце роликов выполнены кольцевые канавки для уменьшения площади их контакта с обрабатываемой поверхностью и повышения контактных напряжений.

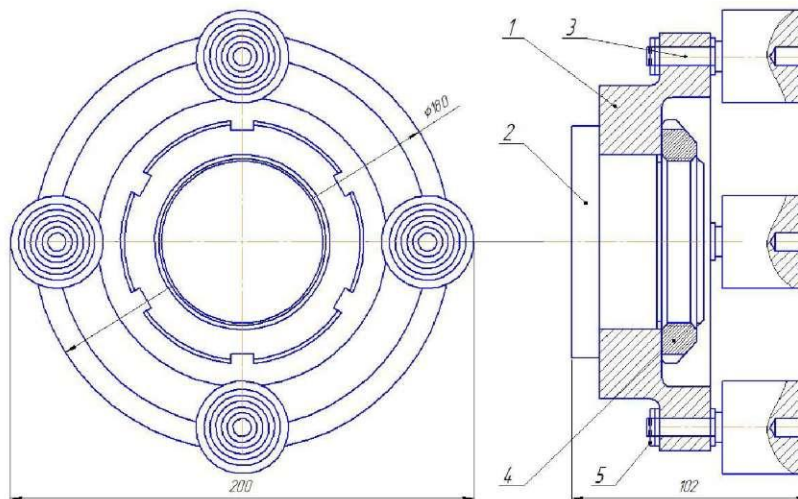


Рис. 6. Устройство для удаления окалины торцовым роликом

Работа устройства осуществляется следующим образом. Торцовые ролики *1* своей рабочей торцевой поверхностью поджимаются к обрабатываемой поверхности, а корпусу *2* через оправку *3* придают вращение. Своей рабочей поверхностью ролики воздействуют на окалину и сдвигают ее в тангенциальном направлении к окружности вращения. Испытания показали, что недостатком устройства является повышенная потребная сила прижима торцов роликов к обрабатываемой поверхности. Так как, несмотря на наличие круговых проточек на



поверхности торцов роликов площадь их контакта роликов с обрабатываемой поверхностью велика, то при встрече с окалиной ролики при недостаточной осевой нагрузке «всплывают» над окалиной, удаляя ее не полностью. Возможно, это устройство будет хорошо работать с рыхлой окалиной, но для удаления «девственной» окалины данное устройство необходимо было модернизировать. Устройство после модернизации представлено на рис. 7.

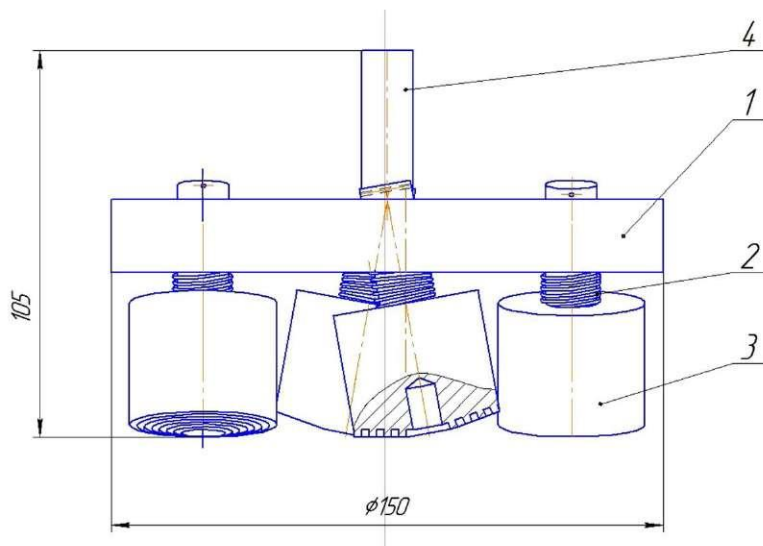


Рис. 7. Устройство для удаления окалины с конусной торцовой поверхностью роликов

Устройство состоит из роликов 1, установленных в корпусе 2, оси 3, предназначенной для передачи вращения корпусу 2 от шпинделя станка и пружин 4. Рабочей поверхностью роликов является торец, имеющую форму пологого конуса, на котором выполнены круговые канавки. В отличие от предыдущего устройства ролики 1 развернуты под острым углом как в направлении вращения – касательной к окружности вращения плоскости, так и в радиальной плоскости. Так как ролики 1 развернуты под углом к направлению вращения корпуса 2, то их контакт с обрабатываемой поверхностью осуществляется по линии образующей конуса торца, если этот угол совпадает с углом конуса, или в точке, если угол наклона роликов больше угла конуса. Это существенно снижает требуемую нагрузку на инструмент и обеспечивает надежный сдвиг окалины при ее контакте с рабочей кромкой ролика. Наклон роликов в радиальной плоскости корпуса 2, как планировалось, должен обеспечить возможность вращения роликов вокруг своей оси в процессе работы устройства. Это необходимо для того, чтобы в работе участвовала не короткая хорда окружности рабочей кромки роликов, а вся окружность, что обеспечит повышенную стойкость инструмента.

Испытания показали, что предложенное устройство хорошо удаляет окалину. Кроме того оно изнашивается таким образом, что режущая кромка даже при значительном износе остается острой. Поэтому этот инструмент не требует постоянной заточки – он самозатачивается в процессе работы. Недостатком устройства является то, что не смотря на разворот роликов в радиальной плоскости даже на значительный угол они, все-таки, не получают вращения вокруг своей оси в процессе работы устройства из-за повышенного трения в опоре. Поэтому в контакте находится хорда рабочей кромки роликов, которая при износе роликов увеличивается в размере. Износ рабочей кромки ролика хорошо виден на фотографии (рис. 8).

Несмотря на то, что режущая кромка при износе остается острой, с увеличением ее площади для вращения роликов требуется создать достаточно большой момент, что технически обеспечить довольно-таки затруднительно. Поэтому было принято решение разработать новое устройство.



Рис. 8. Фотография торца ролика после испытаний

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Был предложен новый оригинальный способ механической удаления окалины, реализованный устройством, представленным на рис. 9 [1].

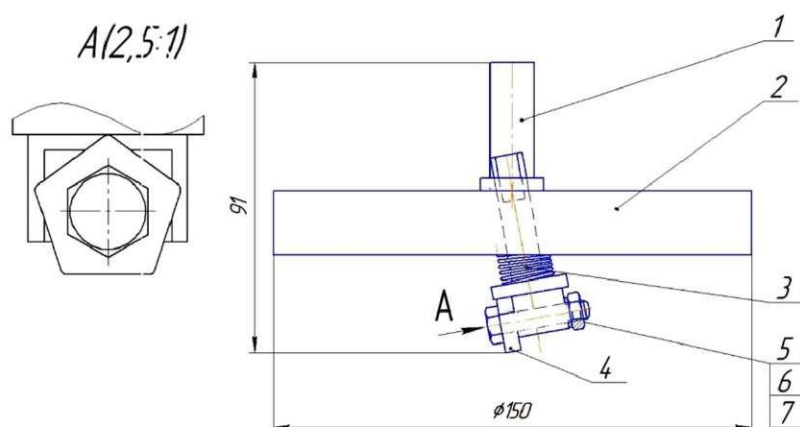


Рис. 9. Устройство для удаления окалины с режущими пластинами

Устройство с режущими пластинами состоит из инструмента *1*, корпуса *2*, оси *3*, пружин *4* и элементов крепления пластины *5*, *6*, *7*. В качестве инструмента используется твердосплавная режущая пластина, закрепленная на цилиндрическом стержне. Инструмент *1* расположен в направлении вращения корпуса *2* под острым углом. Это уменьшает задний угол пластины, а, следовательно, требуемую силу прижима пластины к обрабатываемой поверхности. Но угол разворота должен быть таким, чтобы пластина хорошо осуществляла сдвиг окалины, но не царапала обрабатываемую поверхность. С другой стороны, площадь контакта пластины с обрабатываемой поверхностью должна быть такой, при которой пластина не будет «всплывать» над окалиной. Если при износе пластины режущая кромка будет оставаться острой, то при правильном выборе параметров пластины и угла ее наклона в направлении вращения, пластина не потребует частых переточек и будет работать до полного износа. Это существенно уменьшает трудоемкость технического обслуживания устройства.

Экспериментальные исследования осуществлялись на вертикально фрезерном станке 6Р12 (рис. 10, *а*) и на плоскошлифовальном шлифовальном станке 3Г71 (рис. 10, *б*).



а)



б)

Рис. 10. Фотографии устройства для удаления окалины, установленного на вертикально фрезерном (а) и плоскошлифовальном станках (б) режущими пластинами

Устройство закреплялось на шпинделе станка с помощью цанги. На столе станка устанавливались тиски, в которых зажимались испытываемые образцы. Вертикальным перемещением стола устанавливалась необходимая сила прижима инструмента к обрабатываемой поверхности. Предварительно с помощью динамометра осуществляется тарировка индикатора, что позволяет по показанию индикатора определять силу прижима образца к инструменту.

В процессе экспериментальных исследований определялся момент сопротивления вращению инструмента в процессе обработки. Определение момента необходимо для проведения последующих опытно-конструкторских работ при проектировании промышленного оборудования, а также для уточнения возможных затрат при эксплуатации оборудования.

Для измерения момента образец закреплялся в предварительно тарированном упорном подшипнике. Величина момента замерялась динамометром ДОРМ-3-0,5, в который упиралась боковая грань образца на заданном расстоянии от оси вращения подшипника. Момент определялся перемножением замеренной силы на плечо.

## ВЫВОДЫ

Как показали дальнейшие экспериментальные исследования, разработанный способ [1] и устройство для его реализации позволили обеспечить 100 процентное удаление не только рыхлой, но и «девственной» окалины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2014105408 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В08В 1/04. Способ очистки поверхности / Королев А.В., Королев А.А. заявл. 13.02.14; опубл. 20.08.15, Бюл. № 23.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Панфилова Анастасия Вячеславовна** – аспирант кафедры ТСУ, тел. 8-917-210-64-35

**Anastasia V. Panfilova** – Postgraduate Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.02.20, принята к опубликованию 15.03.20*

**А.А. Трошин, О.В. Захаров**

## **МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ НА КООРДИНАТНО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ**

***Аннотация.** В настоящее время значительная часть измерений сложных поверхностей выполняется с использованием координатно-измерительных машин. Одним из важных этапов обработки измерительной информации является фильтрация полученного сигнала. Существующие стандарты не регламентируют координатные измерения в общем случае. Поэтому актуальны исследования по применимости методов фильтрации и выбору оптимальных параметров фильтров. На основе обзора получивших наибольшее применение в других областях техники фильтров определена стратегия их применения для координатных измерений. Рекомендуется применять следующую последовательность: исключение грубых ошибок на основе критерия Граббса, дискретное преобразование Фурье для выявления систематических погрешностей, исключение из сигнала систематических погрешностей, минимизация случайной погрешности с помощью билатерального фильтра Гаусса, восстановление поверхности после фильтрации на основе обратного преобразования Фурье. Приведенный пример фильтрации при измерении плоскости подтвердил эффективность предложенной стратегии.*

***Ключевые слова:** измерение, координатно-измерительная машина, фильтрация, преобразование Фурье, критерий Граббса, билатеральный фильтр*

**A.A. Troshin, O.V. Zakharov**

## **FILTRATION METHODOLOGY FOR MEASURING OPERATIONS USING COORDINATE MEASURING MACHINES**

***Abstract.** At present, a research into filtration methodologies and selection of optimal filter dimensions is of primary importance. Based on an overview of the filters widespread in other fields of technology, a strategy has been worked out as for their application for coordinate measurements. For this purpose, the following chain is suggested: elimination of serious errors using the Grubbs' test, using discrete Fourier transform to find out systematic inaccuracy, elimination from signaling systematic errors, minimization of random errors based on bilateral Gaussian filter, surface reconditioning after filtration based on the inverse Fourier transform. The given filtration case for the surface measurement proved effectiveness of the proposed approach.*

***Keywords:** measurement, coordinate measuring machine, filtration, Fourier transform, Grubbs' test, bilateral filter*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Измеренный сигнал на координатно-измерительных машинах (КИМ) представляет собой совокупность координат точек в пространстве. При обработке измеренного сигнала часто возникает необходимость удаления шума, представляющего собой сумму случайной

погрешности средства измерения и шероховатости поверхности. Обязательным этапом в обработке сигнала является исключение грубых ошибок. Также в ряде случаев полезно выявление систематических составляющих погрешности поверхности детали для установления причин их возникновения при обработке.

В настоящее время отсутствуют общепринятые рекомендации по фильтрации сигнала при измерениях на КИМ. Известны лишь несколько работ, посвященных этой проблеме [1-4]. Поэтому целесообразно руководствоваться стандартом ISO 16610-1:2015 и аналогией с задачами измерения круглости и шероховатости, рассмотренными в [6-8]. Так для измерения шероховатости используется линейный фильтр Гаусса [4], а для круглости – гармонический анализ на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [3]. Выделяют два типа фильтрации – пространственную и временную. В метрологии поверхностей традиционно применяют пространственную фильтрацию. Фильтр Гаусса относится к линейным методам пространственной фильтрации, в то время как преобразование Фурье – к частотным методам.

Проблемы, связанные с шумоподавлением, возникают при обработке изображений. Существуют обширные исследования и разработано множество методов фильтрации для задачи обработки изображений. Эти методы могут быть применены для фильтрации измеренного сигнала на КИМ. Среди известных методов можно выделить следующие направления: вейвлет-преобразования [9-12], билатеральный фильтр [12-14] и сглаживающий сплайн [15,16].

*Фильтрация сигнала при измерении на КИМ призвана решить следующие задачи:*

- 1) *исключение грубых ошибок измерения;*
- 2) *минимизация случайных ошибок датчика касания;*
- 3) *выявление и исключение изъянов поверхности;*
- 4) *выявление систематических погрешностей поверхности;*
- 5) *исключение из рассмотрения шероховатости поверхности.*

Взаимная связь погрешностей поверхности и измерения и используемых методов фильтрации показана на рис. 1. Из него видно, что не существует единственного метода фильтрации, который может решить все необходимые задачи. Поэтому целесообразно выбрать два-три фильтра для получения наибольшей эффективности решения требуемой задачи.



Рис. 1. Связи погрешностей и методов фильтрации

Определенную сложность представляет разделение погрешностей, имеющих различную физическую причину, но похожее проявление и математическое описание. К таким случаям относятся: погрешности датчика касания и шероховатости поверхности; грубые ошиб-

ки измерения и изъяны поверхности. В первом случае обе погрешности имеют случайный характер. Однако шероховатость поверхности является реальным геометрическим объектом, а погрешность датчика касания обусловлена различием фиксации момента касания по различным направлениям и колебаниями в системе.

Во втором случае имеются выпадающие из общего ряда отдельные измерения. С одной стороны, это могут быть грубые ошибки измерения, обусловленные субъективными причинами. С другой стороны, на поверхности могут объективно присутствовать изъяны. Понятие об изъянах поверхности и их классификация даны в стандарте ISO 8785:1998. Для разделения грубых ошибок и изъянов поверхности можно использовать кластерный анализ. Грубая ошибка представляет собой единичный выброс из общего ряда измерений. Изъян поверхности имеет определенную протяженность и проявляется в нескольких измеренных точках. Стандарт ISO 5725-2:1994 рекомендует для определения грубых ошибок использовать критерий Граббса.

При измерении шероховатости используется линейный фильтр Гаусса с 75% полосой пропускания [10]. Оценка геометрии поверхности предполагает учет неровностей с определёнными длинами волн и исключение из рассмотрения остальных неровностей. При выделении шероховатости из общего профиля отсекают волнистость и отклонения формы. В этом случае термин фильтрация подразумевает разделение компонент профиля на составляющие с различными длинами волн. В то же время использование методов линейной фильтрации не позволяет получить приемлемое решение, если спектры сигнала и помехи перекрываются. В этих случаях оптимальным решением будет нелинейный фильтр.

Дискретное преобразование Фурье необходимо при фильтрации для решения двух задач. Первая задача заключается в выявлении систематических составляющих погрешности формы. Это требуется для установления причин их появления при обработке деталей и коррекции технологии изготовления. Вторая задача заключается в декомпозиции сигнала для возможности дальнейшей фильтрации низких частот. Для этого исключается систематическая составляющая сигнала, проводится фильтрация, а затем сигнал восстанавливается.

*Результаты измерений, содержащие грубые ошибки, способны существенным образом исказить геометрическую модель и правильное определение размеров и формы деталей. Поэтому в качестве первого этапа фильтрации выступает именно исключение грубых ошибок.*

Большинство существующих критериев отбраковки выбивающихся из общего ряда данных опирается на предположение о принадлежности измеренных случайных величин нормальному закону. К таким критериям относятся простые критерии Граббса, применяемые для проверки на аномальность выделяющихся результатов измерений. Использование именно этих критериев рекомендует стандарт ISO 5725-2:1994. Статистики критерия Граббса предусматривают возможность проверки на наличие в выборке либо одного аномального результата измерения (наименьшего или наибольшего), либо двух (двух наименьших в выборке или двух наибольших).

Для проверки на один выброс исходные данные располагают в порядке возрастания и вычисляют статистику Граббса  $G$  по формуле:

$$G = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{s}, \quad (1)$$

где  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ .  $n$  – число измерений.

Для проверки значимости наименьшего результата наблюдения вычисляют тестовую статистику  $G_1$ :

$$G_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s}. \quad (2)$$

В случае если значение тестовой статистики меньше (или равно) 5%-го критического значения, то тестируемую позицию признают корректной. В случае если значение тестовой статистики больше 5%-го критического значения и меньше (или равно) 1%-го критического значения, то тестируемую позицию называют квазивыбросом. В случае если значение тестовой статистики больше 1%-го критического значения, то тестируемую позицию называют статистическим выбросом.

Гауссовский фильтр в настоящее время является единственным стандартизованным фильтром текстуры поверхности согласно ISO 16610-21:2011. Этот стандарт определяет длинноволновый (низкий) гауссовский фильтр как непрерывную взвешенную свертку для открытого профиля, с весами, принимающими классическую гауссову колоколообразную форму и срезающую длину волны 50% сигнала. Коротковолновый фильтр Гаусса (высокая частота) определяется как разность между профилем поверхности и компонентом профиля длиной волны, возникающим в результате длинноволнового гауссовского фильтра с той же 50%-ной длиной волны отсечки. Стандарт ISO 16610-21:2011 не дает никакой информации о реализации (алгоритмы, проблемы реализации и т.д.) фильтра Гаусса. Также в этом стандарте нет значений допуска. Вместо допусков графическое представление отклонений реализованного гауссовского фильтра от заданного гауссова фильтра дается в виде процентного значения в диапазоне длин волн от 0,01 до 100 отсечек.

Линейный фильтр Гаусса описывается зависимостью:

$$GI|_p = \sum_{q \in S} G_s(\|p - q\|) I_q, \quad (3)$$

где  $G_s = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$ ,  $\sigma$  стандартное отклонение распределения Гаусса.

Маска фильтра такова, что центральный элемент маски имеет наибольшее значение и соответствует пиксу распределения Гаусса. Значения остальных элементов уменьшаются по мере удаления от центрального элемента. Уменьшение происходит в соответствии с распределением Гаусса.

Билатеральное фильтрование представлено в работе [6], а также в задачах обработки изображений и применимо для шумоподавления измеренных отклонений. Использование билатерального фильтра предполагает вычисление величины отклонения в точке (для цифрового изображения – интенсивности пикселя) как среднего взвешенного интенсивностей соседних величин отклонений в окрестности заданного радиуса. Вес соседних отклонений изменяется в соответствии со значениями расстояний между точками (пространственный вес) и со значением величины отклонений (интенсивности пикселей для изображений) в точках – ранговый фильтр.

Билатеральный фильтр Гаусса описывается зависимостью:

$$BGI|_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_s(\|p - q\|) G_R(|I_p - I_q|) I_q, \quad (4)$$

где  $G_R$  – ранговый фильтр (весовая функция подобия),  $W_p$  – нормирующий коэффициент.

Билатеральный фильтр начинается со стандартной гауссовой фильтрации с пространственным ядром  $G_s$ . Однако вес пикселя зависит также от функции  $G_R$  в области интенсивности, которая уменьшает вес пикселей с большими различиями в интенсивности. На практике используют гауссовский для  $G_s$  в пространственной области и гауссовский для  $G_R$  в области интенсивности. Выходной сигнал двумерного фильтра в точке  $S$  равен:

$$BG(I)_p = \frac{\sum_{q \in S} G_s(\|p-q\|) \chi_{i_r}(|I_p - I_q|) I_q}{\sum_{q \in S} G_s(\|p-q\|) \chi_{i_r}(|I_p - I_q|)} \quad (5)$$

Гармоническое отклонение формы представляет собой сумму гармонических функций. Множество гармоник можно оценить посредством использования Фурье-анализа. Для параметрически заданной поверхности  $f(u, v)$ , имеющую  $U \times V$  точек, двумерное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) представляет собой выражение:

$$Zf(\omega_1, \omega_2) = \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{v=0}^{V-1} f(u, v) e^{-2\pi i(\omega_1 u + \omega_2 v)}, \quad (6)$$

где  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\omega_1, \omega_2$  - частоты поверхности вдоль параметров  $u$  и  $v$ .

Функция  $Zf(\omega_1, \omega_2)$  представляет собой отображение функции  $f(u, v)$  в частотной области. Используя полученный ряд Фурье, можно определить амплитуды и длины волн, отвечающих за систематические составляющие погрешностей, имеющих периодический характер. Для определения значимых гармоник используется величина поверхностной спектральной плотности мощности:

$$P(\omega_1, \omega_2) = \frac{|Zf|^2 (\Delta u \cdot \Delta v)}{U \cdot V} \quad (7)$$

По спектральной плотности мощности выбирают  $n$  значимых гармоник с максимальным значением. Вычисленные гармоники используются для декомпозиции погрешности и последующего воспроизведения гармонической составляющей погрешности формы с помощью обратного двумерного ДПФ:

$$f(u, v) = \sum_{\omega_1=0}^{U-1} \sum_{\omega_2=0}^{V-1} Zf(\omega_1, \omega_2) e^{2\pi i(\omega_1 u + \omega_2 v)}. \quad (8)$$

Особенностями применения ДПФ к задаче измерения будут следующие. Во-первых, предполагается, что к моменту ДПФ из рассмотрения исключена погрешность расположения базовых поверхностей. В противном случае возможно появление ложных низкочастотных составляющих сигнала. Во-вторых, длина измеренного сигнала должна быть достаточно большой по отношению к гармоническим отклонениям формы, т.е. больше периода первой гармоники в Фурье-образе. Если это условие не будет соблюдено, то помимо того, что не удастся выявить низкочастотные гармоники, также появится искажение в спектре сигнала. В-третьих, частота дискретизации при измерении поверхности должна быть достаточной для выявления всех значимых гармонических составляющих. Условием является выполнение соотношения  $n \leq 2p - 1$ .

В качестве примера рассмотрим измерение плоскости. Измерения проводились для плоскости размера  $100 \times 100$  мм с равномерным разбиением сеткой контрольных точек через 10 мм. В результате был получен массив из 121 контрольной точки. С целью определения закона и параметров распределения измерение производилось в заданных точках 30 раз. Массив измеренных точек всех экспериментов представлен на рис. 2. Проверка по критериям согласия Пирсона и Колмогорова подтвердила нормальное распределение для большинства измеренных точек плоскости.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

По стандартной методике ISO 12781-2:2011 рассчитано значение плоскостности. Моделирование и обработка результатов проводилась с помощью разработанной программы в среде Matlab с использованием как стандартных, так и оригинальных процедур филь-



трации. Результаты представлены на рис. 3. Последовательно визуализированы этапы фильтрации и показаны: а – исходные погрешности поверхности; б – случайные погрешности после исключения систематических погрешностей из исходной; в – спектр ДПФ; г – выявленные ДПФ систематические погрешности; д – случайные погрешности после применения билатерального фильтра; е – восстановленные погрешности поверхности после фильтрации.

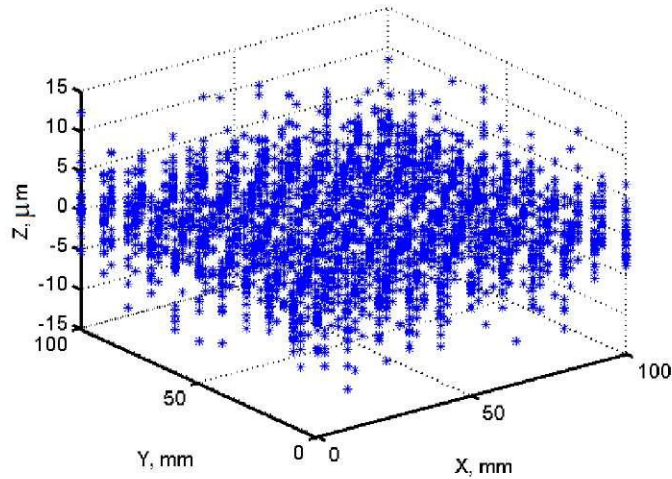
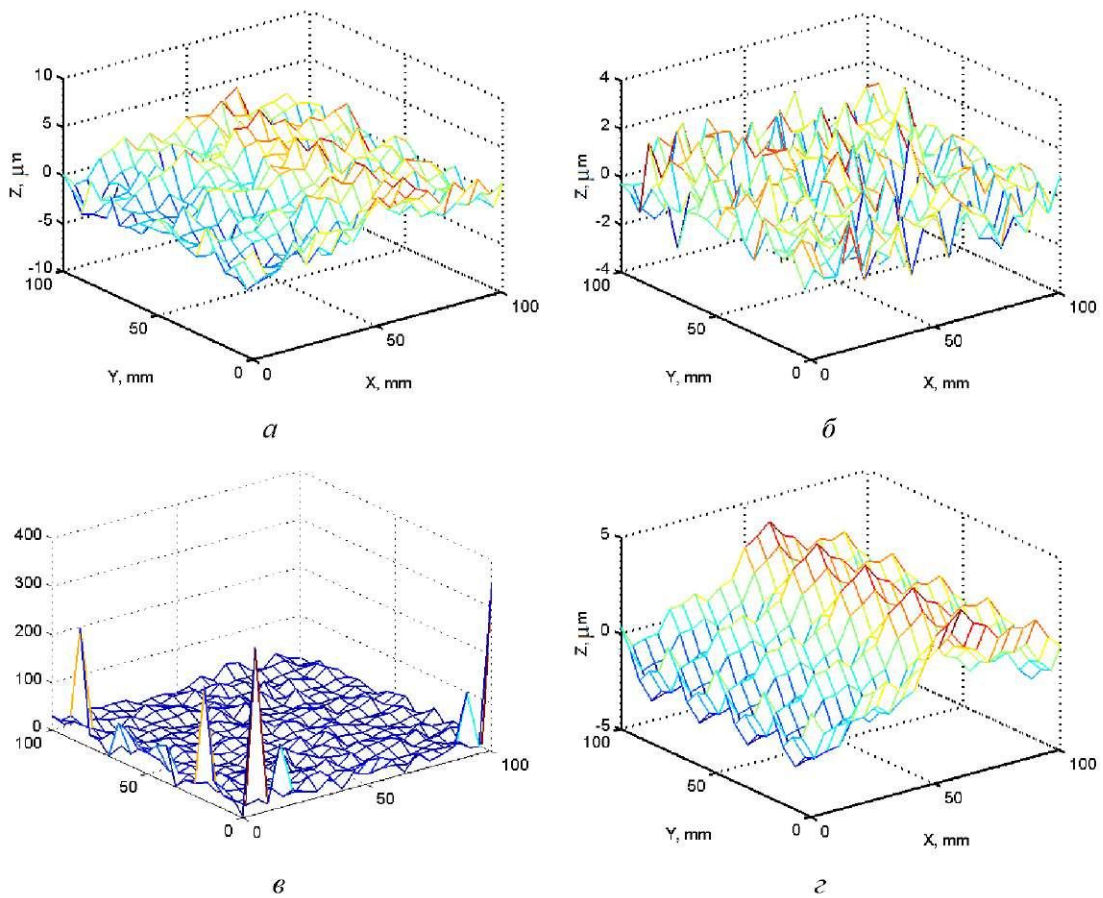


Рис. 2. Массив измеренных точек плоскости



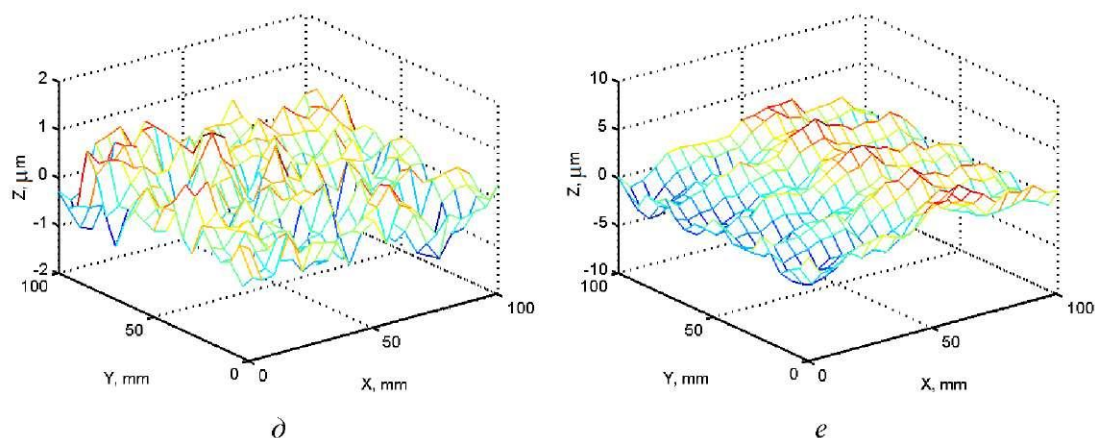


Рис. 3. Фильтрация погрешностей плоскости

Максимальное значение погрешности плоскости исходно составило 6,91 мкм, при этом среднеарифметическое значение 0,02 мкм, стандартное отклонение 0,15 мкм. В результате ДПФ выявлены 3 гармоники с частотами  $n = 1, 3, 10$  и амплитудами  $a = 1,64, 0,70, 0,23$  мкм по оси  $x$  и 2 гармоники с частотами  $n = 4, 8$  и амплитудами  $a = 1,10, 0,52$  мкм по оси  $y$ . После фильтрации и восстановления поверхности получено максимальное значение погрешности 4,82 мкм, среднеарифметическое значение 0,01 мкм, стандартное отклонение 0,08 мкм.

Для фильтрации случайных погрешностей в условиях производства отсутствует возможность выполнять многократные измерения поверхностей одной и той же детали. Поэтому процедуру необходимо проводить по данным, полученным после однократного измерения. Таким образом, важной задачей является подбор подходящего математического аппарата для фильтрации случайных погрешностей и определение параметров выбранного фильтра. В качестве оптимизируемых параметров выступают: уровень спектральной плотности мощности ДПФ и дисперсии для пространственной и ранговой функций Гаусса билатерального фильтра.

## ВЫВОДЫ

Представлена попытка научного обоснования для применения методов фильтрации в общем случае при координатных измерениях. В основу исследований положены рекомендации стандартов ISO 5725-2:1994, 8785:1998, 16610-1:2015, 16610-21:2011 и аналогия с задачами измерения круглости и шероховатости. Предложено использовать критерий Граббса для исключения грубых ошибок, билатеральный фильтр Гаусса для фильтрации случайных измерительных погрешностей и двумерное дискретное преобразование Фурье для выявления систематической погрешности поверхности. Рассмотренный пример измерения и фильтрации данных для плоскости подтвердил правильность применения выбранных методов фильтрации и определения их параметров. Основным результатом фильтрации является минимизация случайной погрешности датчика касания прибора и выявление систематических погрешностей поверхности для корректировки технологии изготовления деталей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клейменов С.И. Развитие средств активного контроля для повышения оперативности решения проблем качества продукции механообработки / С.И. Клейменов, А.В. Зятров, В.Н. Козловский, В.И. Санчугов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. № 3. С. 5-13.

2. Гречников Ф.В. Проектирование технологических процессов сборки по критериям точности / Ф.В. Гречников, С.Ф. Тлусенко // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2011. № 3-4. С. 38-43.
3. Захаров О.В. Измерение отклонения от круглости с использованием гармонического анализа / О.В. Захаров // Контроль. Диагностика. 2006. № 1. С. 49-51.
4. Печенин В.А. Модель координатных измерений геометрии поверхностей сложной формы / В.А. Печенин, М.А. Болотов, Н.В. Рузанов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2015. Т. 21. № 4. С. 675-685.
5. Фомин А.А. Обеспечение микрогеометрии поверхностей при обработке заготовок с неоднородными свойствами / А.А. Фомин // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2012. № 12 С. 27-29.
6. Печенин В.А. Модель распознавания элементов геометрии пера лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Печенин, М.А. Болотов, Н.В. Рузанов // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2018. № 3. С. 102-108.
7. Гречников Ф.В. Итерационный метод коррекции радиуса сферического шупа мобильных координатно-измерительных машин при контроле поверхностей вращения / Ф.В. Гречников, А.Ф. Резчиков, О.В. Захаров // Измерительная техника. 2018. № 4. С. 21-24.
8. Янюшкин А.С. Качество поверхности после алмазной обработки безвольфрамовых твердых сплавов / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов, Д.В. Лобанов, В.Ю. Попов, Е.Д. Лосев // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 1. С. 20-24.
9. Никитина И.П. Методика измерения резцов с помощью координатно-измерительной машины в ручном режиме / И.П. Никитина, С.В. Каменев, А.Н. Поляков // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2018. № 11. С. 105-113.
10. Захарченко М.Ю. Современные проблемы автоматизации и управления в машиностроении / М.Ю. Захарченко, А.А. Игнатьев, В.А. Добряков // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов, 2019. С. 41-48.
11. Никольский А.А. Особенности точного измерения профилей поперечных сечений некруглых изделий на кругломерах без предварительного центрирования и юстировки осей прибора / А.А. Никольский, В.В. Королев // Технология машиностроения. 2018. № 1. С.39-48.
12. Салов П.М. Контроль работоспособности шлифовального круга / П.М. Салов, Н.В. Носов, Д.П. Салова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4-2 (84). С. 238-241.
13. Королев А.В. Обеспечение качества подшипников качения на основе применения технологии многоциклового нагружения / А.В. Королев, А.Ф. Балаев, А.С. Яковишин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 7. С. 291-293.
14. Елисеев Ю. С. Прогнозирование погрешностей сборки изделий с использованием действительных моделей деталей / Ю.С. Елисеев, М.А. Болотов, В.А. Печенин, И.А. Грачев, Е.В. Кудашов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18. № 2. С. 128-137.
15. Гречников Ф.В. Минимизация объема измерений при контроле цилиндрических поверхностей на основе статистического моделирования / Ф.В. Гречников, А.С. Яковишин, О.В. Захаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2017. № 4. С. 101-110.
16. Хаймович И.Н. Формирование поверхностей пера лопаток с использованием ин-терполяционных сглаживающих сплайнов / И.Н. Хаймович // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 2. С. 41-44.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Трошин Андрей Александрович** – аспирант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

**Andrey A. Troshin** – Postgraduate, Department of Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Захаров Олег Владимирович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

**Oleg V. Zakharov** – Dr. Sc. (Engineering), Professor, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.02.20, принята к опубликованию 15.03.20*

# МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

---

УДК 536.75; 539.31

**А.В. Королев**

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

*Аннотация.* С помощью термодинамических методов получено качественное представление о поведении материалов при термоупругих деформациях с учетом температурной зависимости коэффициента жесткости.

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

**A.V. Korolev**

## THERMODYNAMIC METHODS FOR RESEARCHING THERMOELASTIC DEFORMATION

*Abstract.* Thermodynamic methods are utilized to receive an understanding of the materials behavior under thermoelastic deformation conditions considering dependence of the stiffness coefficient on the temperature ratio.

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

### **ВВЕДЕНИЕ**

Анализ научных исследований показал [1], что на надежность и работоспособность машиностроительных изделий оказывают многочисленные конструктивные, технологические, материаловедческие факторы. Одним из направлений исследования является разработка математической модели процесса сопротивления качению и износа тел с обобщенной формой рабочих поверхностей [2].

Другим – является материаловедческое направление, в котором речь идет о повышении качества изделий за счет применения высококачественных современных материалов, высокоточного оборудования и уникальных технологий. Однако последние достижения носят скорее эмпирический характер, т.к. недостаточно развиты методы прогнозирования, основанные на исследовании физических свойств материалов. Развитие таких методов, включая термодинамические [3], может явиться резервом повышения качества многочисленных изделий машиностроительной отрасли. Применение термодинамических методов обусловлено характером протекания процессов и позволяет выделить наиболее общие и наиболее конкретные признаки физики этих процессов.

При рассмотрении процессов термоупругости твердых тел важным является способ подведения тепла, так как модуль сдвига и модуль Юнга зависят от того, как происходит

теплопередача. Если для модуля Юнга этот вопрос является достаточно очевидным [4], то нахождение соотношения между адиабатическим и изотермическим модулями сдвига представляет определенный интерес. Найдем связь между адиабатическим и изотермическим модулем сдвига на примере закручивающегося кольца стержня.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим стержень, который закручивается вращательным моментом  $N$  на угол  $\varphi$ . Для такого случая справедливо соотношение:

$$dN = Gld\varphi, \quad (1)$$

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

Элементарная работа по закручиванию стержня равна:

$$dA = Nd\varphi. \quad (2)$$

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

$$dU = \left(\frac{dU}{dT}\right)_{\varphi} dT + \left(\frac{dU}{d\varphi}\right)_{T} d\varphi. \quad (3)$$

С учетом формул (2) и (3) первое начало термодинамики примет вид:

$$dQ = \left(\frac{dU}{dT}\right)_{\varphi} dT + \left(\left(\frac{dU}{d\varphi}\right)_{T} + N\right) d\varphi. \quad (4)$$

По определению теплоемкости имеем:

$$C = \frac{dQ}{dT} = \left(\frac{dU}{dT}\right)_{\varphi} + \left(\left(\frac{dU}{d\varphi}\right)_{T} + N\right) \left(\frac{d\varphi}{dT}\right)_{N}. \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$C_{\varphi} = \left(\frac{dU}{dT}\right)_{\varphi}. \quad (6)$$

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

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

При выполнении условия адиабатичности ( $dQ = 0$ ), уравнение (4) преобразуется к виду:

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

Определив полный дифференциал температуры в координатах  $N, \varphi$  и используя его в преобразовании уравнения (9), получим:

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

Из уравнения (10) получим:

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

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

Используя соотношение (1), можно записать выражения для  $G_Q$  и  $G_T$  – модулей сдвига при адиабатическом и изотермическом процессе

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

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

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

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

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

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

$$\alpha l^i = x, \quad (16)$$

где:  $F$  – сила,  $x$  – удлинение.

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

$$dx = \alpha dl^i + l^i \frac{\partial \alpha}{\partial T} dT \quad (17)$$

Уравнение для внутренней энергии будет иметь вид:

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

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

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

Используя уравнения (18,19) получим:

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

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

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

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

Сравнивая уравнения (19) и (20) находим:

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

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

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

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

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

Найдем смешанные произведения:

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

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

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

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

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

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

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

Анализируя формулу (29) можно сделать вывод, что если частная производная от  $\alpha$  больше нуля, то энтропия возрастает с увеличением силы. Учитывая, что энтропия является мерой неупорядоченности, можно предположить, что структура материала, у которого выполняется обратное условие становится более однородной и это условие может являться критерием при прогнозировании поведения материала при термоупругих деформациях в случае реализации сделанного предположения о характере температурной зависимости обратного коэффициента жесткости.

Более общим является подход, основанный на динамической модели цепочки колеблющихся атомов, в которой применяется система классических уравнений Ньютона и законов термодинамики, с помощью которых можно получить выражение для температурной зависимости энтропии. Это выражение позволяет оценить структурные изменения твердого тела, которые



в условиях сохранения дальнего порядка при температурах отличных от температуры плавления, проявляются в изменении формы и размеров кристаллитов. В предлагаемой одномерной модели эти изменения соответствуют изменению расстояния между атомами.

Рассмотрим модель упругого кольца длиной  $l$ , массой  $M$  и единичной площадью поперечного сечения. Его можно представить как предельный случай системы  $N$  частиц (атомов) с массой  $m$  и равновесным расстоянием  $a$  между ними, которые связаны пружинами с коэффициентом жёсткости  $\gamma$ , при условиях:  $N \rightarrow \infty$ ,  $a \rightarrow 0$ ,  $Nm = M$ ,  $Na = l$ . Температурная зависимость  $\gamma(T)$  определяется с учетом парного потенциала Морзе [5].

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

где  $\gamma_0$  – потенциал Морзе при низких температурах,  $\eta = -\beta\sigma/a$  – константа, зависящая от свойств металлов,  $\beta$  – коэффициент теплового линейного расширения,  $\sigma$  – константа Морзе.

Определим величину  $\gamma_0$  по формуле  $\gamma_0 \approx 2\varepsilon\sigma^2$ , где  $\varepsilon$  – энергия связи, которую атом преодолевает при смещении на расстояние  $a$ . Это значение  $\gamma_0$  дает возможность оценить величину  $\gamma$ , исходя из формулы 1 при  $T = 1000$  К и равную примерно  $0,5 \gamma_0$  при значениях констант, указанных ниже.

Приведем значения используемых табличных и рассчитанных величин [6,7].

Таблица значений физических констант

Металлы	К	Ва	Са	Рв	Аl
$\varepsilon, 10^{-18}$ Дж	0,083	0,22	0,26	0,37	0,42
$a, \text{нм}$	6,3	5,3	4,5	3,7	3,2
$\gamma_0, 10^{-3}$ Н/м	4,1	15	33	12	100
$\sigma, (10^{-10} \text{ м})^{-1}$	0,05	0,06	0,08	0,04	0,11
$\beta, 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	83	45	32	29	24

С учетом того, что  $\beta \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ ,  $\sigma \approx 0,06 (10^{-10} \text{ м})^{-1}$ ,  $a \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ , то  $\eta \approx 15 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$  и в области температур  $T \leq 1000$  К, где ангармонизм имеет существенное значение, имеет место неравенство  $\eta T < 1$ , которое будет использоваться при решении данной задачи.

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

Уравнения Ньютона такой системы имеют вид:

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

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

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

где  $C_n$  – комплексная амплитуда колебаний  $n$ -ой частицы,  $\omega$  – частота колебаний, одинаковая для всех частиц,  $k$  – волновой вектор.

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

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

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

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

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

где  $\psi$  – фаза комплексной амплитуды  $A$ .

При условии  $k\alpha / 2 \ll 1$ , когда длина волны  $\lambda = 2\pi / k \gg \alpha$ , то  $\sin(k\alpha / 2) \approx k\alpha / 2$  и уравнение (32) в длинноволновом приближении примет вид (34).

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

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

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

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

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

где  $l_0$  – длина стержня при нуле градусов Кельвина.

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

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

где  $\Pi_{cp}$  – усреднённый поток энергии,  $v_{гр}$  – групповая скорость.

По определению среднего потока энергии имеем:

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

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

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

По определению групповой скорости имеем:

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

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

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

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

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

где  $k_0$  – постоянная Больцмана.

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

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

Теперь выражение для энергии примет вид:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сравнивая формулы (48) и (49), получим:

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

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

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

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

Волновой вектор  $k_p$  определяется следующей формулой:

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

Анализ формулы (52) с учетом численных значений используемых величин показывает, что основной вклад в увеличении энтропии с ростом температуры дает линейное расширение тел. Одним из способов уменьшить этот рост является уменьшение коэффициента жесткости. Это может произойти при усилении релаксационных процессов на границах зерен поликристаллических структур. Из таблицы, приведенной в тексте, видно, что с увели-

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

### ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ поведения энтропии от температуры может служить для оценки прочностных свойств исследуемых структур. Отмеченные эффекты четко проявляются в процессе изготовления деталей подшипников, так как в процессе механической и термообработки в кольцах подшипников возникают межкристаллические сдвиги, сопровождаемые явлениями ползучести, а при работе подшипника в результате деформации проявляется эффект усталости, приводящий к появлению микротрещин и разрушению деталей. Прогнозирование этих явлений на основе предложенных математических моделей позволяет учесть влияние указанных факторов на работоспособность машиностроительных изделий, что является одной из целей работ, проводимых в рамках проекта СГТУ – 162.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В.М. Контактные задачи в машиностроении / В.М. Александров Б.Л. Ромалис. – М.: Машиностроение, 1986. – 174 с.
2. Королев А.В. Математическое моделирование упругих тел сложной формы. – Саратов: Сарат. Гос. Техн. Ун-т. 2001 – 128 с.
3. Кузнецов В.А. Динамическая модель термоупругости с учетом ангармонизма. – Саратов: Известия СГУ. Серия Физика. 2011. – С. 48-52.
4. Беляев Н.М. Соппротивление материалов. – М.: Машиностроение, 1954. – 326 с.
5. Morse P.M. Diatomic molecules according to the wave mechanics / Phys. Rev. 1929, v. 34. – P. 57-69.
6. Girifaalco L.A. Application of Morse potential function to cubic metals / Girifaalco L.A., Weicer V.G. – Ibid. 1959, v. 114, P. 687-695.
7. Рабинович В.А. Краткий химический справочник / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин. – Л.: Химия, 1991. – 432 с.
8. Ландау Л.Д. Механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: 1965. – 203 с.
9. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. – М.: Наука, 1978. – 616 с.
10. Коротков П.Ф. Молекулярная физика и термодинамика. – М.: МФТИ, 2001. – 286 с.
11. Драпкин Б.М. Легирование и прогноз упругих свойств материалов для широкого диапазона температур / Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Леонов Б.Н. – Перспективные материалы. 1998. №3. – С. 11-18.
12. Лысак Л.И. Физические основы термической обработки стали / Л.И. Лысак, Б.И. Николин. – Киев.: Техника, 1975. – 327 с.

## Металлургия и материаловедение

=====

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России – Задание № 9.896.2014/К на выполнение НИР в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Королев Альберт Викторович –  
доктор технических наук профессор  
СГТУ имени Гагарина Ю.А.

**Albert V. Korolev** –  
Dr. Sc. (Engineering), Professor, Department of  
Control Systems Technology in Mechanical  
Engineering, Yuri Gagarin State  
Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.02.20. принята к опубликованию 15.03.20*

**В.И. Проскуряков, Н.А., Дуланов, С.А. Бородина**

## **УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т ЛАЗЕРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ ПОРОШКОМ СИЛИЦИДА МОЛИБДЕНА**

*Аннотация.* В статье приведены результаты исследования процесса лазерного упрочнения нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н10Т с применением легирующего порошка силицида молибдена. Установлено, что лазерное легирование приводит к формированию равномерно распределенного микрорельефа поверхностного слоя и повышению его микротвердости. Проведен сравнительный анализ влияния предварительной подготовки поверхности абразивно-струйной обработкой и шлифованием на величину микротвердости.

*Ключевые слова:* лазерное упрочнение, микротвердость, хромоникелевые стали, лазерное легирование

**V.I. Proskuryakov, N.A. Dulanov, S.A. Borodina**

## **HARDENING THE 12X18H10T CHROME-NICKEL STEEL SURFACE USING MOLYBDENUM SILICIDE POWDER FOR LASER DOPING**

*Abstract.* The outcome of research into laser hardening of the stainless 12Kh18N10T steel using the molybdenum silicide doping powder is presented. It has been established that laser doping ensures forming a uniform microrelief of the surface layer and increases its microhardness. A comparative analysis is made to find out the impact of preliminary surface treatment by means of abrasive-blasting and glazing procedures on its microhardness properties.

*Keywords:* laser hardening, microhardness, chromium-nickel steel, laser doping

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время на мировом и российском рынках большую популярность нашли хромоникелевые стали, содержащие в среднем 18% хрома и 10% никеля. Такие стали благодаря своим физико-механическим свойствам, коррозионной стойкости, а также доступности нашли широкое применение в медицинской, нефтяной, химической, машиностроительной и других отраслях промышленности [1-5]. Изделия из нержавеющей стали 12Х18Н10Т характеризуются длительным сроком службы. Однако работающие в условиях контактного трения, в средах, содержащих ионы хлора, а также серную или соляную кислоты, такие изделия подвергаются коррозии и преждевременному изнашиванию. Известно, что для увеличения их ресурса зачастую достаточно поверхностного упрочнения за счет модифицирования поверхностного слоя [6].

На сегодняшний день лазерное легирование металлов и сплавов является прогрессивным и эффективным методом модификации рабочих поверхностей, повышающим эксплуатационные свойства металлических изделий. При определенных технологических режимах лазерной обработки, а также в зависимости от легирующего элемента модифицированный поверхностный слой может обладать повышенными механическими характеристиками, теплостойкостью, коррозионной стойкостью и т.д.

Наиболее широко распространенным является способ лазерного импульсного легирования с заранее подготовленной поверхностью. Подготовка поверхности предусматривает нанесение на неё обмазки определенного компонентного состава. Следует отметить, что та-

кой способ требует создания предварительной шероховатости поверхности для обеспечения удержания обмазки. Преимуществами данной технологии являются возможность варьирования полученными свойствами поверхности, локальность воздействия, относительная простота реализации технологического процесса обработки.

Для лазерного легирования хромоникелевой стали 12Х18Н10Т и повышения её механических характеристик имеются рекомендации по применению различных химических элементов и соединений в качестве обмазок. Однако промышленно изготавливаемых обмазок сегодня не производится. Известно, что для изготовления легирующих обмазок зачастую используют медицинский клей, не вызывающий газообразования при горении и не содержащий вредных неметаллических включений. Также необходимо учесть, что введение в металл или сплав в качестве легирующего компонента молибдена или титана приводит к значительному повышению физико-механических характеристик [7-9].

В этой связи целью работы являлось исследование возможности упрочнения поверхности нержавеющей стали аустенитного класса 12Х18Н10Т лазерным импульсным легированием в слое обмазки, а также проведение сравнительного анализа влияния предварительной подготовки поверхности на величину микротвердости опытных образцов.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на образцах нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н10Т в виде пластин размерами 7×7×2 мм. Часть образцов подвергалась предварительной абразивноструйной обработке (АСО) частицами порошка электрокорунда дисперсностью 200-250 нм, другая часть – шлифованию (Ш) влагостойкой наждачной бумагой зернистостью Р230.

Образцы очищали от технологических загрязнений методом ультразвуковой очистки с использованием ванны «Кристал-2.5» в водном растворе этилового спирта в течение 20 мин.

В качестве обмазки использовались медицинский клей БФ-6 и порошок силицида молибдена дисперсностью  $\leq 25$  нм, которые смешивались до образования однородной суспензии. Подготовленная паста наносилась на поверхность образцов равномерно распределённым слоем толщиной 200-300 нм. Модифицирование поверхностного слоя проводили на автоматизированной установке для термофизической когерентной модификации поверхности LRS-50А, при напряжении импульса  $U = 250, 300, 350, 400$  В и длительности  $\tau$  импульсного воздействия 0,5 мс. Луч фокусировался в пятно диаметром 0,5 мм. Сканирование поверхности осуществлялось при частоте следования импульсов излучения 20 Гц и коэффициенте перекрытия 0,25.

Модифицированная поверхность исследовалась методом оптической микроскопии с использованием микроскопа МБС-10 м.

Микротвердость измерялась с использованием твердомера ПМТ-3М с индентором Виккерса при нагрузке на индентор 1.961 Н (ISO 6507-1:2005). Статистическую обработку результатов исследования проводили с использованием программы DataFit 9.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модифицированная поверхность опытных образцов, предварительно прошедших АСО, характеризуется более равномерно распределённым рельефом (рис. 1а). На предварительно шлифованной поверхности визуализируется локальное оплавление обработанных участков (рис. 1б).

Результаты измерений микротвердости  $H$  показали существенное упрочнение поверхности опытных образцов в результате лазерного импульсного легирования – с  $1,4 \pm 0,1$  ГПа до  $6,87 \pm 0,1$  ГПа (таблица). Установлено, что предварительная абразивноструйная обработка поверхности приводит к увеличению микротвердости более чем в три раза. Такое явление связано с эффектом наклепа поверхностного слоя опытных образцов частицами электрокорундового порошка.

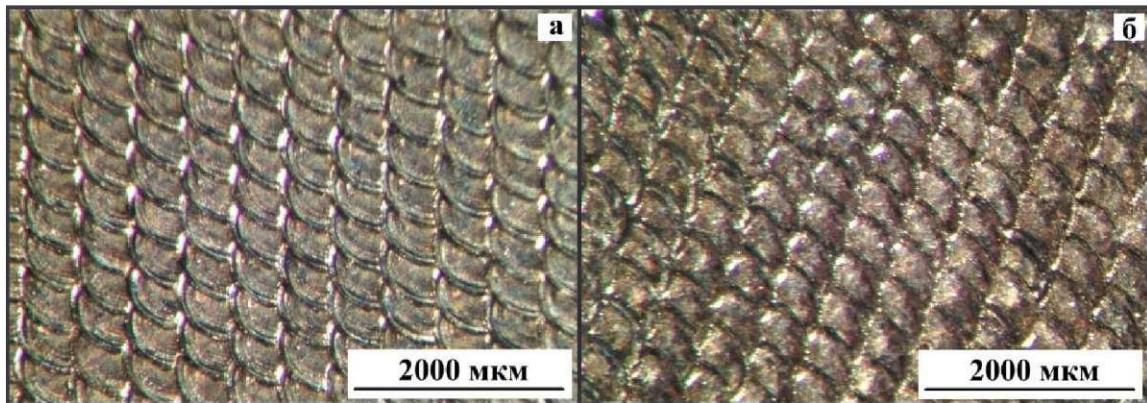


Рис. 1. Поверхность стали 12X18H10T после лазерного легирования, предварительно подвергнутая абразивноструйной обработке (а) и шлифованию (б)

Результаты измерения микротвердости модифицированной поверхности стали 12X18H10T

АСО			Ш		
$\tau$ , мс	U, В	H, ГПа	$\tau$ , мс	U, В	H, ГПа
0,5	250	3,84	0,5	250	2,4
	300	4,04		300	2,41
	350	3,27		350	2,43
	400	6,87		400	3,4

По результатам измерения были построены графики зависимости микротвердости модифицированного поверхностного слоя от напряжения импульса (рис. 2).

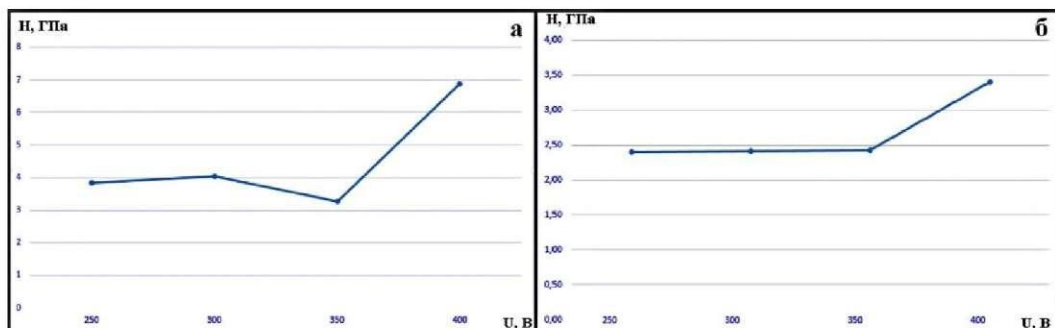


Рис. 2. Зависимость микротвердости модифицированной поверхности стали 12X18H10T:  
а – поверхность, модифицированная после абразивноструйной обработки,  
б – поверхность, модифицированная после шлифования

## ВЫВОДЫ

Построенные зависимости свидетельствуют о том, что значительный рост микротвердости модифицированной поверхности происходит при напряжении импульса свыше 350 В. Такой диапазон режимов лазерной обработки (при напряжении импульса 350–400 В) характеризуется сильным оплавлением поверхности. В связи с этим можно предположить, что при таких режимах лазерного импульсного воздействия диффузия легирующих элементов, в частности частиц порошка силицида молибдена, протекает более активно.

На основании полученных результатов эксперимента было выявлено влияние предварительной обработки поверхности стали и последующего лазерного легирования в слое обмазки на величину микротвердости поверхности. Установлено, что в результате предварительной абразивноструйной обработки и последующего лазерного легирования с нанесенной суспензией, из-



готовленной из медицинского клея БФ-6 и порошка силицида молибдена, на модифицированном участке нержавеющей хромоникелевой стали происходит формирование высокотвердого поверхностного слоя, характеризующегося равномерно распределенным микрорельефом.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Коломийцев Е.В. Коррозионно-усталостная прочность тавровых соединений стали 12Х18Н10Т и методы ее повышения // Автоматическая сварка. 2012. №. 12. С. 41-43.
2. Родионов И.В. Костные металлоимплантаты с оксидными биосовместимыми покрытиями // сб. трудов XV Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Томск: Изд-во ТПУ, 2009. Т.1. С. 569-571.
3. Родионов И.В. Коррозионные потенциалы различных видов поверхностей стальных ортопедических остеофиксаторов в физиологическом растворе // Коррозия: материалы, защита. №11, 2009. С. 6-10.
4. Тарасова Т.В., Белашова И.С., Кузьмин С.Д., Казаков А.В. Лазерная термообработка коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т // Материалы XIX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. 2013. С. 38-42.
5. Родионов И.В. Металлооксидные имплантационные системы в современной медицинской технике // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. №. 1. С. 98-104.
6. Родионов И.В. Применение технологии воздушно-термического оксидирования для получения оксидных биосовместимых покрытий на чрескостных остеофиксаторах из нержавеющей стали // Перспективные материалы. 2012. №. 4. С. 36.
7. Ким В.А., Башков О.В., Сатаева И.В. Локальное лазерное легирование нержавеющей стали 12Х18Н10Т // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. Т. 1. №. 2. С. 64-70.
8. Цай К.В., Максимкин О.П., Гусев М.Н. [и др.]. Особенности формирования микроструктуры при пластической деформации в облученной нейтронами нержавеющей стали 12Х18Н10Т // Научно-технический журнал «Вестник НЯЦ РК». 2009. вып. 4. С. 77-85.
9. Попов В.О., Сайфулин Д.Э., Шмелева И.Ю. Возможности лазерного упрочнения инструмента // РИТМ. 2011. № 9. С 25–26.

### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Проскуряков Виталий Игоревич** –  
аспирант Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.  
Моб. тел. 8962-617-0770

**Дуланов Никита Алексеевич** –  
бакалавр БМЕТЛ-41 Саратовского  
государственного технического университета  
имени Гагарина Ю.А. Моб. тел. 89003128732

**Бородина Софья Александровна** –  
студент (бакалавр) 64СТЗС-21  
Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.  
Моб. тел. 8960-353-8086

**Vitaly I. Proskuryakov** –  
Postgraduate Yuri Gagarin  
State Technical University of Saratov

**Nikita A. Dulanov** –  
Bachelor Student Yuri Gagarin  
State Technical University of Saratov

**Sofya A. Borodina** –  
Bachelor Student Yuri Gagarin  
State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.02.20, принята к опубликованию 15.03.20*

**В.И. Проскуряков, С.С. Ширин, С.А. Бородина, А.Г. Темралиева**

## **ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ 12X18H10T ПОРОШКОМ ДИОКСИДА ТИТАНА**

*Аннотация.* Представлены результаты исследования лазерной порошковой модификации поверхности нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T частицами диоксида титана дисперсностью  $\leq 25$  нм. Проведен сравнительный анализ гранулометрического состава модифицированной поверхности. Определены зависимости суммарной пористости и микротвердости поверхности опытных образцов от режимов лазерного воздействия.

*Ключевые слова:* нержавеющая хромоникелевая сталь, поверхностное упрочнение, контактное трение, лазерная импульсная обработка

**V.I. Proskuryakov, S.S. Shirin, S.A. Borodina, A.G. Temraliyeva**

## **LASER SURFACE MODIFICATION OF THE STAINLESS 12X18H10T STEEL USING TITANIUM DIOXIDE POWDER**

*Abstract.* The outcome of the laser surface modification of the austenitic stainless 12X18H10T steel by means of titanium dioxide particles with the dispersion degree at  $\leq 25$  nm is provided. A comparative analysis of the grain-size composition of the modified surface is carried out. The dependence of total porosity and microhardness of the surface of test samples on the laser exposure modes is determined.

*Keywords:* stainless chromium-nickel steel, surface hardening, contact friction, laser pulse processing

### **ВВЕДЕНИЕ**

Нержавеющая хромоникелевая сталь марки 12X18H10T за счет высокой коррозионной стойкости широко применяется в химической, пищевой, машиностроительной, медико-технической и других отраслях промышленности [1-5]. Однако зачастую изделия из нержавеющей сталей, работающие в условиях контактного трения, под воздействием повышенных температур и вибронагрузок подвергаются преждевременному износу. В этой связи возникает необходимость продления срока службы таких изделий. Для повышения их эксплуатационных характеристик применяют различные методы поверхностного упрочнения. На сегодняшний день наиболее актуальной технологией модификации поверхностного слоя металлов и сплавов является обработка поверхности лазерными импульсами. Основными преимуществами лазерной обработки являются: возможность формирования высокопрочного поверхностного слоя с заданными параметрами структуры и физико-механических свойств.

Лазерная импульсная обработка позволяет проводить такие технологические операции, как поверхностная закалка, сварка, легирование и наплавка. В частности, лазерную порошковую наплавку можно проводить подачей легирующего элемента в область воздействия импульса при помощи специального оборудования или предварительным нанесением легирующего материала на обрабатываемую поверхность. В результате анализа научно-технической литературы установлено, что обеспечению высокой адгезии порошковых материалов и активному протеканию диффузии легирующих элементов в поверхностный слой металла способствует создание исходной шероховатости поверхности. Также известно, что

для формирования мелкозернистой структуры из мартенсита и остаточного аустенита, а также повышения износостойкости и уменьшения склонности к межкристаллитной коррозии в состав низкоуглеродистых сталей вводят титан и ниобий [6-8].

В связи с этим целью настоящей работы являлось определение влияния лазерной порошковой наплавки диоксида титана (анатаза) на морфологические характеристики, гранулометрический состав и микротвердость модифицированной поверхности стали 12Х18Н10Т.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на образцах нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н10Т в виде пластин размерами 10×10×4 мм. Образцы подвергались предварительной абразивноструйной обработке (АСО) частицами порошка электрокорунда дисперсностью 200-250 мкм.

Образцы очищали от технологических загрязнений методом ультразвуковой очистки с использованием ванны «Кристал-2.5» в водном растворе этилового спирта в течение 20 мин.

В качестве легирующего материала использовался порошок диоксида титана с кристаллической решеткой анатаза дисперсностью  $\leq 25$  нм. Порошок наносился на поверхность образцов равномерно распределённым слоем толщиной 150-250 мкм. Модифицирование поверхностного слоя проводили на автоматизированной установке для термофизической когерентной модификации поверхности LRS-50А при напряжении импульса  $U = 250, 300, 350$  и  $400$  В и длительности  $\tau$  импульсного воздействия 1 мс. Луч фокусировался в пятно диаметром 0,5 и 1 мм. Сканирование поверхности осуществлялось при частоте следования импульсов 10 Гц и коэффициенте перекрытия 0.25.

Морфология и микротвердость поверхности исследовались с использованием микротвердомера ПМТ-3М и его оптической системы. Анализ структуры поверхности проводили согласно известной методике по изображениям участков поверхности площадью  $0,5 \text{ мм}^2$  с применением программного комплекса «Metallograph» [9]. Статистическую обработку результатов исследования проводили с использованием компьютерной программы DataFit 9.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поверхность стали после лазерной обработки характеризуется равномерно распределённым рельефом. Визуализируются существенные отличия у поверхностей, модифицированных при одном значении напряжения импульса, но при разных диаметрах сфокусированных в пятно лазерных импульсов (рис. 1).

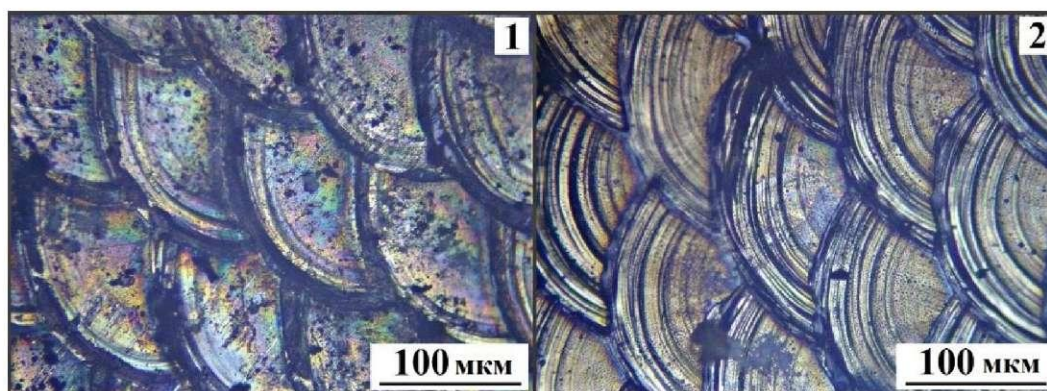


Рис. 1. Поверхность опытных образцов после лазерной порошковой модификации:  
– 1 –  $U = 400$  В и  $d = 0,5$  мм, 2 –  $U = 400$  В и  $d = 1$  мм

Согласно проведенному гранулометрическому анализу модифицированной поверхности установлено, что при увеличении диаметра и напряжения импульса существенно увеличиваются средний размер пор и частиц (приблизительно в два раза). При диаметре пятна излучения  $d = 0,5$  мм наблюдается значительное уменьшение количества пор (в три раза) с увеличением напряжения импульса. Количество и размер зерен при этом остается практически неизменным. Следует отметить рост пор с  $5 \pm 1$  мкм до  $10 \pm 1$  мкм и зерен с  $6 \pm 1$  мкм до  $12 \pm 1$  мкм у поверхностей, обработанных при диаметре пятна излучения  $d = 1$  мм (таблица 1).

Таблица 1

Результаты гранулометрического анализа поверхности стали 12Х18Н10Т после лазерной порошковой модификации

Режимы лазерной обработки		Характеристики поверхности стали						
		Частицы			Поры			
d, мм	U, В	Кол-во, шт.	Среднее значение, мкм	Дисперсия, мкм <sup>2</sup>	Кол-во, шт.	Среднее значение, мкм	Дисперсия, мкм <sup>2</sup>	Суммарная пористость, %
0,5	250	742	6,83	18,08	1209	6,34	14,24	44
	300	753	7,56	16,92	550	7,97	21,77	56
	350	663	8,66	17,60	488	5,57	21,33	41
	400	796	7,74	17,44	445	9,05	26,09	48
1	250	832	5,39	13,66	592	6,67	16,10	67
	300	291	7,3	23,65	500	6,89	18,12	30
	350	1319	7,47	5,87	1315	7,97	6,43	69
	400	446	10,32	22,48	178	12,34	36,60	60

Одной из значимых характеристик поверхности является пористость (P, %). По результатам измерений была построена эмпирическая модель зависимости открытой пористости от режимов лазерного воздействия (таблица 1, рис. 2).

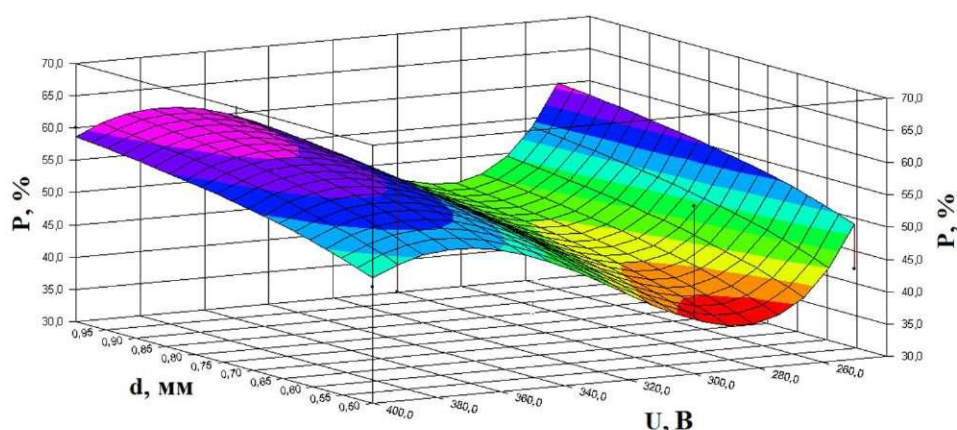


Рис. 2. Зависимость пористости (P, %) модифицированной поверхности стали от напряжения и диаметра импульса

Построенная модель описывается регрессионным уравнением:

$$(P = 301376,5 - 9,25 \times x_1 + 156361,5 \times x_1 - 0,041 \times x_1^3 + 27031,9 \times x_1^4 - 1556,9 \times x_1^5 - 107,407 \times x_2 + 81,48 \times x_2^2),$$

где:  $x_1$  – напряжение импульса (U, В) и  $x_2$  – диаметр сфокусированного в пятно лазерного импульса (d, мм).

На построенной эмпирической модели видно, что общая пористость поверхности хромоникелевой стали зависит в большей степени от напряжения импульса (рис. 2). С уменьшением этого параметра величина открытой суммарной пористости значительно снижается. Следует отметить, что самая низкая пористость наблюдается при минимальных значениях напряжения импульса ( $U = 280 - 260$  В).

Результаты измерения микротвердости модифицированной поверхности образцов нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н10Т показали ее существенное увеличение в отличие от исходной – с  $1,4 \pm 0,2$  ГПа до  $4,04 \pm 0,2$  ГПа (таблица 2).

Таблица 2

Результаты измерения микротвердости поверхности стали 12Х18Н10Т после лазерной порошковой модификации

Режимы лазерной обработки		Микротвердость			
		При нагрузке на индентор 0,48 Н		При нагрузке на индентор 1,96 Н	
d, мм	U, В	HV	ГПа	HV	ГПа
0,5	250	272±0,2	2,66±0,2	246±0,2	2,41±0,2
	300	150±0,2	1,47±0,2	271±0,2	2,65±0,2
	350	210±0,2	2,06±0,2	338±0,2	3,31±0,2
	400	257±0,2	2,5±0,2	412±0,2	4,04±0,2
1,0	250	202±0,2	2,0±0,2	445±0,2	2,56±0,2
	300	150±0,2	1,47±0,2	232±0,2	2,27±0,2
	350	192±0,2	1,88±0,2	205±0,2	2,01±0,2
	400	225±0,2	2,2±0,2	312±0,2	3,06±0,2

По полученным результатам измерения была построена эмпирическая модель зависимости микротвердости модифицированной поверхности от напряжения импульса и диаметра лазерного импульса (рис. 3).

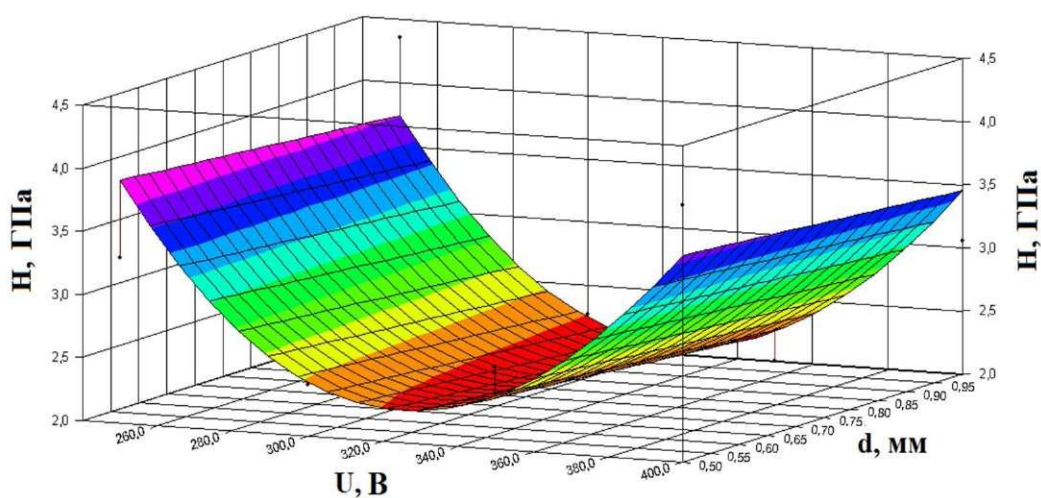


Рис. 3. Зависимость микротвердости модифицированной поверхности стали от режимов лазерного импульсного воздействия

Построенная эмпирическая модель описывается регрессионным уравнением:

$$H = 42,77 + 0,284 \times x_1 - 6,03 \times x_2 - 3,40 \times x_1^2 - 77,44 \times x_2^2 - 0,355 \times x_1/x_2,$$

где:  $x_1$  – напряжение импульса (U, В) и  $x_2$  – диаметр сфокусированного в пятно лазерного импульса (d, мм).

## ВЫВОДЫ

В ходе экспериментов было установлено, что лазерная порошковая модификация диоксидом титана (анатазом) при определенных параметрах лазерного импульса приводит к формированию равномерно распределенного поверхностного слоя. Модифицированная поверхность характеризуется повышенными показателями микротвердости. Максимальное значение микротвердости  $H = 4,04 \pm 0,2$  ГПа было получено при напряжении импульса  $U = 400$  В и диаметре импульса  $d = 0,5$  мм.

Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ (конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре – «Аспиранты»), проект № 19-33-90101.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родионов И.В., Ромахин А.Н. Изменение микротвердости нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н9Т при упрочняющей термической обработке на воздухе и в среде перегретого водяного пара / Материалы II Междунар. научн.-практ. конф. «Перспективное развитие науки, техники и технологий». В 2-х томах. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. Том 2. С. 88-91.
2. Родионов И.В. Металлооксидные имплантационные системы в современной медицинской технике // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. Т.10. №1. 2013. С. 98-104.
3. Родионов И.В., Ромахин А.Н. Термическое оксидирование как технология упрочняющей обработки поверхности стали 12Х18Н9Т // Научно-технологические проблемы машиностроения. 2013. №6 (24). С. 37-43.
4. Родионов И.В., Фомин А.А., Ромахин А.Н. Применение процессов термического оксидирования для упрочнения поверхности стали 12Х18Н9Т // Технология металлов. 2013. №10. С. 24-32.
5. Ромахин А.Н., Родионов И.В., Фомин А.А., Пошивалова Е.Ю. Металлокерамические оксидные покрытия в производстве шнековых осадительных центрифуг из нержавеющей хромоникелевых сталей / Сб. трудов II Междунар. научн.-практич. конф. «Инжиниринг Техно». Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо». 2014. Т. 2. С. 49-57.
6. Григорьянц А.Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2006. – 664 с.
7. Ким В.А., Башков О.В., Сатаева И.В. Локальное лазерное легирование нержавеющей стали 12Х18Н10Т // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. Т.1. №. 2. С. 64-70.
8. Проскураков В.И., Родионов И.В., Кошуро В.А., Куц Л.Е., Перинская И.В. Изменение морфологии, структуры и микротвердости образцов циркониевого сплава в результате воздействия лазерными импульсами // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. В. 1. С. 12-15.
9. Fomina M., Koshuro V., Papshev V., Rodionov I., Fomin A. Surface morphology data of tantalum coatings obtained by electrospark alloying Data in Brief. 2018. 20. P. 1409–1414.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Проскуряков Виталий Игоревич** –  
аспирант Саратовского государственного  
технического университета имени Гагарина Ю.А.  
Моб. тел. 8962-617-0770

**Vitaly I. Proskuryakov** –  
Postgraduate Yuri Gagarin State  
Technical University of Saratov

**Ширин Станислав Сергеевич** –  
студент (бакалавр) бМЕТЛ-41  
Саратовского государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.  
Моб. тел. 8909-341-7709

**Stanislav S. Shirin** –  
Bachelor Student Yuri Gagarin State  
Technical University of Saratov

**Бородина Софья Александровна** –  
студент (бакалавр) б4СТЗС-21  
Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.  
Моб. тел. 8960-353-8086

**Sofya A. Borodina** –  
Bachelor Student Yuri Gagarin State  
Technical University of Saratov

**Темралиева Анжелика Гилмовна** –  
студент (бакалавр) бМЕТЛ-41  
Саратовского государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.  
Моб. тел. +7964-849-3198

**Angelika G. Temralieva** –  
Bachelor Student Yuri Gagarin State  
Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.02.20, принята к опубликованию 15.03.20*

**А.А. Фомин, М.Е. Федосеев, П.А. Палканов,  
А. Аман, В.А. Кошуро, А.И. Шумилин**

## **ИНДУКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЬНЫХ ПУАНСОНОВ С МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ И ДИАГРАММЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ СТАЛИ 45**

*Аннотация.* В работе представлены результаты по влиянию упрочняющей индукционно-термической обработки образцов вытяжных штампов на их эксплуатационные характеристики. Показано, что наличие на поверхности инструментальной стали износостойкого цирконийсодержащего покрытия повышает качество процесса вытяжки тонколистовой стали С45 (аналог конструкционной стали 45). При анализе экспериментальных диаграмм предельных деформаций установлено, что пуансоны из углеродистой стали У8 с металлокерамическим Zr(O) покрытием расширяют область вытяжки по основной компоненте деформации  $\varepsilon_1$  с 28-31 до 43-44% и по побочной компоненте деформации  $\varepsilon_2$  с 23 до 26 % (области растяжения) и с -3 до -11% (области сжатия).

*Ключевые слова:* индукционно-термическая обработка, металлокерамическое покрытие, вытяжной штамп, диаграмма предельных деформаций

**A.A. Fomin, M.E. Fedoseev, P.A. Palkanov,  
A. Aman, V.A. Koshuro, A.I. Shumilin**

## **INDUCTION-HEAT TREATMENT OF STEEL PUNCHES WITH CERAMIC METAL COATING AND STRESS-STRAIN DIAGRAMS FOR 45# STEEL**

*Abstract.* Effects of induction-heat treatment of the drawing die samples on their operational characteristics are presented. As is demonstrated, availability of wear-resistant zirconium coating over the instrument steel surface improves the drawing quality of the steel sheet C45 (an analogue of the structural steel 45). Analysis of the stress-strain test diagrams showed that the carbon U8 steel punches with ceramic metal Zr (O) coatings expand the drawing area with the main strain component  $\varepsilon_1$  from 28-31 to 43-44%, and with the minor strain component  $\varepsilon_2$  from 23 to 26% (in tensile regions) and from -3 to -11% (in compression areas).

*Keywords:* induction-heat treatment, ceramic metal coating, drawing die, stress-strain diagram

### **ВВЕДЕНИЕ**

При металлообработке, в частности формоизменяющих операциях листовой штамповки, важно определить предельные деформации, которые может воспринимать металл [1,2]. Главной характеристикой, описывающей деформационную способность любого металла и сплава, является диаграмма предельных деформаций (*Forming Limit Diagram*) или FLD-диаграмма. Эта характеристика используется для прогнозирования формообразования тонколистового металла. Обычно для определения FLD-диаграммы используются методы Наказимы (*Nakazima Test*) и Марсиниака (*Marciniak Test*), в которых предусмотрено ис-



пользование пуансона с полусферической или плоской со скруглениями рабочей частью (зарубежный стандарт ISO 12004-2:2008).

В системе «пуансон – листовой металл» необходимо обеспечить максимальную вытяжку при минимальных напряжениях без образования дефектов, например трещин, разрывов и складок (рис. 1).

Известно, что для снижения усилия трения и улучшения характеристик вытяжки на поверхность стального штампового инструмента наносятся износостойкие покрытия, например нитридов, карбидов и карбонитридов, а также алмазоподобных пленок [3]. Однако есть экспериментальные результаты, согласно которым для повышения износостойкости и улучшения функциональных качеств металлообрабатывающего инструмента (сменных пластин режущего инструмента) можно использовать оксидные покрытия, в частности диоксида титана и циркония [4–6]. Для улучшения условий трения необходимо правильно выбрать смазочно-охлаждающую жидкость или использовать покрытие с твердой смазкой, например из дисульфидов металлов [2].

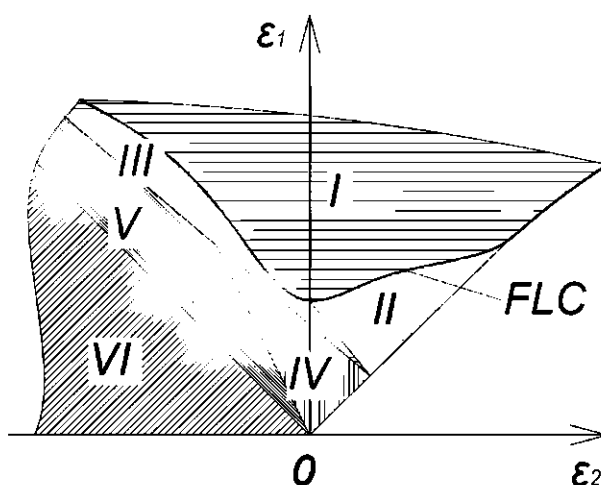


Рис. 1. Диаграмма предельных деформаций для определения вытяжной способности тонколистового металла: I – зона разрушения; II – недопустимое утонение; III – опасность возникновения разрывов; IV – отсутствие дефектов; V – опасность возникновения складок; VI – возникновение складок; FLC – кривая предельных деформаций; основная  $\varepsilon_1$  и побочная  $\varepsilon_2$  компоненты деформаций

Таким образом, в данной работе исследуется твердость полученных металлокерамических Zr(O) покрытий на стальных пуансонах и определяются диаграммы предельных деформаций по методу Наказимы при вытяжке тонколистовой конструкционной стали С45.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Стальные пуансоны диаметром 14 мм и радиусом полусферической части 7 мм, изготовленные из высокоуглеродистой инструментальной стали У8 (мас. %: С – 0,76–0,83; Si – 0,17–0,33; Mn – 0,17–0,33; Ni – <0,25; S – <0,028; P – <0,03; Cr – <0,2; Cu – <0,25; Fe – остальное), подвергались индукционной закалке (от температуры 780–800°C) и среднему отпуску для обеспечения твердости 50–52 HRC. Для сравнения использовался стандартный пуансон, изготовленный из стали DIN 1.3343 (зарубежный аналог быстрорежущей инструментальной стали P6M5; мас. %: С – 0,82–0,9; Si <0,5; Mn – <0,5; Ni – <0,4; S – <0,025; P – <0,03; Cr – 3,8–4,4; Mo – 4,8–5,3; W – 5,5–6,5; V – 1,7–2,1; Co – <0,5; Fe – остальное) с твердостью рабочей части 62–64 HRC без износостойкого покрытия.

Далее на поверхность экспериментальных образцов пуансонов, предварительно подготовленных шлифованием с обеспечением шероховатости  $Ra$  0,16, вакуумно-

конденсационным методом (магнетронным распылением на постоянном токе) было нанесено покрытие циркония (мишень изготовлена из циркония марки Э110) с толщиной около 800–810 нм.

Затем проводилась упрочняющая индукционно-термическая обработка (ИТО) для получения кислородно-насыщенного  $Zr(O)$  слоя с высокой твердостью (Рис. 2а). Температура обработки  $T$  составила 400–450 и 500–550°C при продолжительной выдержке  $t = 5$  мин. При большей температуре и продолжительности ИТО покрытия  $Zr(O)$  растрескивались, что исключало их использование в качестве износостойкого слоя для пуансонов.

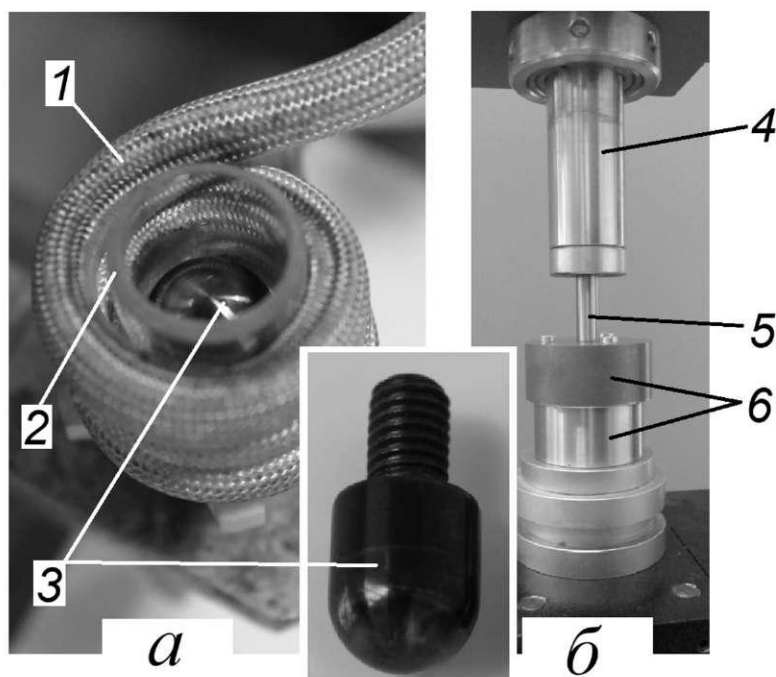


Рис. 2. Общий вид процесса вытяжки: а – расположение пуансона 3 с  $Zr(O)$  покрытием в кварцевой камере 2 камеры для термической обработки с индуктором 1; б – расположение матрицы 6, хвостовика пуансона 5 и штока прессы 4 на гидравлическом прессе

Микротвердость  $Zr(O)$  покрытия на поверхности стальных пуансонов измерялась с применением твердомера «ПМТ-3» при нагрузке на алмазный индентор Виккерса равной 50 гс.

Тест на вытяжку (по методу Наказимы) предусматривал изготовление стальных дисков из стали С45 толщиной 1 мм, диаметром 44 мм и с диаметрально расположенными краевыми вырезами разного радиуса  $R$  от 0 до 20 мм. На поверхности дисков с помощью лазера со сканирующей системой делалась разметка в виде сетки с шагом 1,5 мм для последующего контроля деформации с применением анализатора геометрических параметров «АГПМ-6М».

Подготовленные образцы размещались в штампе, состоящем из верхней и нижней половин (рис. 2б). Сменная часть соединялась с хвостовиком инструмента и устанавливалась в отверстие матрицы. Штамп в сборе располагался в гидравлическом прессе, который обеспечивал усилие не менее 10 тс. При испытании рабочее усилие не превышало 22 кН, которое изменялось в зависимости от формы стальных дисков и выбранного типа функционального слоя (покрытия). Проводимые испытания осуществлялись в условиях трения скольжения с применением смазочно-охлаждающей жидкости «Kerry KR-941» на основе полидиметилсилоксановой жидкости (<30%), алифатических углеводородов (>30%), нафтеновых и ароматических углеводородов (<10%).

Измеренные деформации наносились на диаграмму в виде кластера точек, через которые строилась кривая предельных деформаций (*Forming Limit Curve*) или FLC-кривая. Далее FLC-кривые наносились на один график для последующего сравнения функциональных характеристик пуансонов без покрытия и с износостойкими Zr(O) покрытиями.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Микротвердость покрытий циркония характеризовалась умеренным значением около 420-450 HV. Полученное значение не достаточно для повышения износостойкости штампового инструмента, поэтому практический интерес представляли покрытия после упрочняющей ИТО. В составе модифицированных покрытий помимо циркония фиксировалось возрастание концентрации кислорода (не менее 4-7 мол.%). Твердость Zr(O) покрытий достигла 670-700 HV, что эквивалентно 59-60 HRC. Твердость стальной основы имела сниженное значение относительно рабочего значения, что необходимо для определения влияния покрытия на качество вытяжки.

Полученное тонкое Zr(O) покрытие улучшало характеристики вытяжки, в частности предельная деформация превышала 40% по основной компоненте  $\varepsilon_1$ , 26% по побочной компоненте  $\varepsilon_2$  в области растяжения и -11% – в области сжатия (рис. 3, кривая 3). Пуансон без покрытия имел сниженные характеристики для вытяжки, а именно  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  не превышало 25% (рис. 3, кривая 1). Для области сжатия (левая полуплоскость диаграммы) хорошие результаты также отмечались у Zr(O) покрытий после ИТО (рис. 3, кривая 3,4).

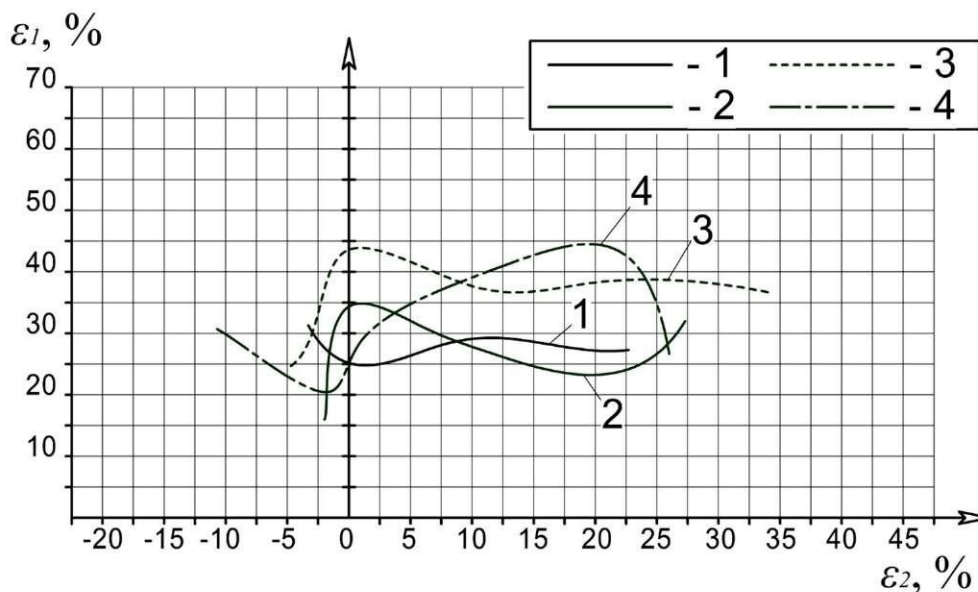


Рис. 3. Диаграммы предельных деформаций и FLC-кривые для различных пуансонов: 1 – сталь 1.3343 (без покрытия); 2 – сталь У8 с покрытием циркония; 3 – сталь У8 с Zr(O) покрытием (ИТО при  $T = 400-450^\circ\text{C}$ ); 4 – сталь У8 с Zr(O) покрытием (ИТО при  $T = 500-550^\circ\text{C}$ )

Данные вытяжки, в частности FLC-кривые, необходимо исследовать в комплексе с данными усилий вытяжки, которые определялись при анализе диаграмм растяжения. Усилия вытяжки также снижались при использовании пуансонов с покрытиями, подвергнутыми ИТО в среднем 0,5–1 кН.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, стальные пуансоны с Zr(O) покрытиями, полученными вакуумно-конденсационным методом (магнетронным распылением на постоянном токе) с последую-

щей индукционно-термической обработкой имеют высокую микротвердость 670–700 HV (эквивалентно 59–60 HRC) и улучшенные эксплуатационные характеристики.

Анализ FLD данных показал, что повышенная твердость и наличие умеренного содержания кислорода в составе циркониевых покрытий позволили расширить область бездефектной вытяжки конструкционной стали С45. Численные показатели процесса формообразования характеризовались относительными величинами, в частности возрастанием деформации  $\varepsilon_1$  по основной компоненте с 28–31 до 43–44% и деформации  $\varepsilon_2$  по побочной компоненте с 23 до 26% (в области растяжения) и с -3 до -11% (в области сжатия).

*Научные результаты получены в рамках гранта Президента Российской Федерации для молодых докторов наук (проект № МД-157.2019.8).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ma B.L., Wan M., Wu X.D., Cai Z.Y., Diao K.S., Han J.Q. Investigation on forming limit of advanced high strength steels (AHSS) under hot stamping conditions // Journal of Manufacturing Processes, 2017. V. 30. pp. 320–327.
2. Ma B., Yuan W., Wu X., Li X., Wan M. Study on temperature distribution of HSS in hot FLD test // Applied Thermal Engineering, 2015. V. 89. pp. 144–155.
3. Pesch P., Sattel S., Woestmann S., Masarczyk P., Herden K., Stucky T., Martens A., Ulrich S., Holleck H. Performance of hard coated steel tools for steel sheet drawing // Surface and Coatings Technology, 2003. V. 163–164. pp. 739–746.
4. Fomin A., Egorov I., Shchelkunov A., Fomina M., Koshuro V., Rodionov I. Composite «1.2361 tool steel – Ti – TiO<sub>2</sub>» structure and its production by resistance welding with subsequent induction heat treatment // Composite Structures, 2018. V. 206. pp. 467–473.
5. Fomin A. Superhard titania coatings produced on titanium using induction heat treatment // Ceramics International, 2019. V. 45(7). pp. 8258–8264.
6. Fomin A. Functionally graded zirconium oxide coatings produced on zirconium using induction heat treatment // Composite Structures, 2019. V. 220. pp. 318–323.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

**Aleksander A. Fomin** – Dr. Sc. (Engineering), Professor, Head: Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Федосеев Максим Евгеньевич** – аспирант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Maksim E. Fedoseev** – Postgraduate Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Палканов Павел Алексеевич** – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Pavel A. Palkanov** – Student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Александр Аман** – Ph.D., руководитель R&D отдела компании «Vollmann Group», Германия

**Alexander Aman** – Ph.D., Head of R&D Department, Vollmann Group, Germany

**Кошуро Владимир Александрович** –  
кандидат технических наук, доцент  
Саратовского государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.

**Vladimir A. Koshuro** –  
PhD (Technical Science), Associate Professor,  
Department of Materials Science and Biomedical  
Engineering, Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

**Шумилин Александр Иванович** –  
кандидат технических наук, доцент Саратов-  
ского государственного технического уни-  
верситета имени Гагарина Ю.А.

**Aleksander I. Shumilin** –  
PhD (Technical Science), Associate Professor,  
Department of Materials Science and Biomedical  
Engineering, Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.02.20, принята к опубликованию 15.03.20*

## Правила оформления и представления статей

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

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

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

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

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

Затем идет текст самой статьи и список литературы.

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

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

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

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

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

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

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

8. К статье прилагается экспертное заключение.

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

10. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

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

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

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

14. Плата с аспирантов за публикацию статьи не взимается.

## Металлургия и материаловедение

### Вестник Саратовского государственного технического университета

– рецензируемое научное периодическое издание по 2 отраслям науки (01.00.00 – Физико-математические науки, 05.00.00 – Технические науки), охватывающим по совокупности 5 групп специальностей (01.02.00 – Механика, 01.04.00 – Физика, 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение, 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление, 05.14.00 – Энергетика).

Журнал имеет следующие соответствующие указанным группам специальностей разделы содержания:

- Математика и механика
- Физика
- Машиностроение и машиноведение
- Информационные технологии
- Энергетика

*Журнал публикует статьи только по данным группам специальностей!*

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