

# ВЕСТНИК

## САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2022

№ 3 (94)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Сентябрь 2022 года

**Учредитель и Издатель:**  
Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.

**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 И.В. Злобина  
**Технический секретарь**  
к.т.н., доцент В.О. Горбачев

**Редакционная коллегия:**  
Д.т.н., проф. А.Н. Васин (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.ф.-м.н., проф. С.Б. Вениг (СНИГУ имени Н.Г. Чернышевского)  
Д.ф.-м.н., проф. М.В. Жигалов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.т.н., проф. О.В. Захаров (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.т.н., проф. А.Е. Зверовщиков (ПГУ)  
К.т.н. А.А. Казинский (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.т.н., проф. А.В. Королёв (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.т.н., проф. В.А. Кушников (СНЦ РАН)  
Д.т.н., проф. А.А. Львов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.т.н., проф. Т.Г. Насад (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. А.Ф. Резчиков (ИПУ РАН)  
Д.т.н., проф. И.В. Родионов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.ф.-м.н., проф. М.Д. Старостенков (АлпГТУ)  
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)

Редактор Л.А. Скворцова  
Компьютерная верстка Т.В. Семеновой  
Перевод на английский язык к.филол.н. А.Х. Аскаровой

Адрес Издателя и редакции:  
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77, к. 25/615  
Телефон: 8 (845-2) 99-89-81  
E-mail: vestnik@ssttu.ru

Подписано в печать 27.09.2022 Дата выхода в свет 30.09.2022  
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.  
Усл. печ. л. 13,0 Уч.-изд. л. 4,0  
Тираж 500 экз. Заказ 50 Цена свободная  
Отпечатано в типографии Издательства СГТУ имени Гагарина Ю.А.  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Полная электронная версия журнала  
размещена в системе РИНЦ  
в открытом доступе на платформе  
eLIBRARY.RU

Свидетельство о регистрации средства массовой  
информации **ПИ № ФС 77-65155** от 28 марта 2016 г.  
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций

© Саратовский государственный  
технический университет, 2022  
ISSN 1999-8341

# VESTNIK

**SARATOV  
STATE  
TECHNICAL  
UNIVERSITY**

**2022**

**№ 3 (94)**

**Scientific Journal**

Since 2003

**Published quarterly**

September 2022

## **Constitutor and Editor**

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

### **Editor-in-chief**

Professor A.A. Ignatiev

### **Editor-in-chief assistant**

Professor Yu.B. Tomashevsky

### **Executive secretary**

PhD, Associate Professor I.V. Zlobina

### **Technical secretary**

PhD, Associate Professor V.O. Gorbachev

### **Editorial board:**

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

Dr. Sc., Professor S.B. Venig (SSU)

Dr. Sc., Professor M.V. Zhigalov (SSTU)

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

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

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

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

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

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

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

Corresponding member of RAS, Dr. Sc., Professor  
A.F. Rezhchikov (ISP RAS)

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

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

Corresponding member of RAE,

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

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

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

Editor L.A. Skvortsova

Computer-based page-proof T.V. Semenova

Rendering: PhD (Philology) A.H. Askarova

Editorial office: 25/615 77, Politechnicheskaya Street  
Saratov, 410054 Russia

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

E-mail: vestnik@sstu.ru

Print date: 27.09.2022. Date of publication 30.09.2022

Format 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 13,0

Publication base sheet 4,0

Circulation: 500 printed copies

Order 50 Contracted price

Publisher and Editorial Address:

77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

**Registration Certificate** of mass media *PI № FS 77-65155* of  
28 March 2016 issued by the Federal Service for Supervision of  
Communications, Information Technology, and Mass Media

eLIBRARY.ru

ISSN 1999-8341

© Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov, 2022

# СОДЕРЖАНИЕ

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

---

- Бочкарев А.В., Землянухин А.И.**  
ОБРАТНОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОСЛОЙНЫХ МОДУЛЕЙ  
УПРУГОСТИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД .....5
- Горбунов В.В., Карпеев А.М., Игнатъев А.А.**  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ  
РОЛИКОВ БУКСОВЫХ ПОДШИПНИКОВ .....19
- Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б.,  
Трегубова Е.В., Аль-Карави Р.Д.**  
ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ МЕРЫ МНОЖЕСТВА  
ДЛЯ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ВЫБОРА ..... 31

## **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

---

- Захаров О.В., Яковишин А.С., Жуков А.В.**  
ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ СЕРИИ ISO 16610 ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ  
ПОВЕРХНОСТИ. ЧАСТЬ 2. ПРОФИЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ ГАУССА ..... 46
- Королев А.В., Охлупин Д.Н., Синев И.В., Авдонин К.А.**  
ПОЛИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ВРАЩЕНИЯ С АЛМАЗНЫМ ПОКРЫТИЕМ .....61

## **ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ**

---

- Джармухамбетова М.А., Викулова М.А., Горшков Н.В.**  
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДОВ  
НА ОСНОВЕ НАНОПОРИСТОГО ГИДРОКСИДА НИКЕЛЯ .....70
- Исмонов Р.Д., Ганиев И.Н., Одиназода Х.О., Сафаров А.М., Алиев Ф.А.**  
ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ИНДИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ,  
ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ  
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АБ1 .....81
- Федоров А.Д., Тимофеев М.Н., Пичхидзе С.Я.**  
К ВОПРОСУ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИТАНИРОВАНИЯ  
И ЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛИ 45 .....92

# CONTENTS

## **INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATIONS**

---

- Bochkarev A.V., Zemlyanukhin A.I.**  
REVERSE CALCULATION OF ELASTIC  
MODULES OF PAVEMENT LAYERS .....5
- Gorbunov V.V., Karpeev A.M., Ignatiev A.A.**  
AUTOMATED EDDY CURRENT CONTROL  
CASTORS OF AXLE BEARINGS .....19
- Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Tomashevskiy Yu.B.,  
Tregubova E.V., Al-Qarawi R.D.**  
APPLICATION OF A FUZZY SET SYSTEM IN SOLVING  
MULTIPLE CRITERIA CHOICE PROBLEMS ..... 31

## **MECHANICAL ENGINEERING**

---

- Zakharov O.V., Yakovishin A.S., Zhukov A.V.**  
APPLICATION OF FILTERS OF ISO 16610-SERIES FOR SURFACE TEXTURE ANALYSIS.  
PART 2. GAUSS PROFILE FILTERS.....46
- Korolev A.V., Okhlupin D.N., Sinev I.V., Avdonin K.A.**  
POLISHING ROTATION PARTS WITH DIAMOND COATING .....61

## **CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY**

---

- Dzharmuhambetova M.A., Vikulova M.A., Gorshkov N.V.**  
ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF ELECTRODES BASED  
ON NANOPOREUS NICKEL HYDROXIDE ..... 70
- Ismonov R.D., Ganiev I.N., Odiazoda H.O., Safarov A.M., Aliev F.A.**  
EFFECT OF INDIUM ADDITIVES ON CORROSION RESISTANCE,  
HEAT CAPACITY AND CHANGES IN THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF  
AB1 ALUMINUM ALLOY .....81
- Fedorov A.D., Timofeev M.N., Pichkhidze S.Ya.**  
THE ISSUES OF SEQUENTIAL TITANIZING  
AND CASE HARDENING OF STEEL 45 .....92



# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

---

УДК 534.13: 625.08

**А.В. Бочкарев, А.И. Землянухин**

## ОБРАТНОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОСЛОЙНЫХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

***Аннотация.** С принятием ГОСТ Р 59918-2021 оценка прочности многослойной дорожной одежды должна сопровождаться вычислением модулей упругости отдельных слоев. Источником информации для решения этой задачи является чаша прогиба поверхности дорожной одежды, определенная экспериментально с помощью установки динамического нагружения. Методика определения модулей упругости слоев по чаше прогиба регламентирована указанным стандартом и базируется на решении задачи теории упругости для многослойного полупространства при помощи интегральных преобразований. Вычислительная сложность задачи, связанная с многократным выполнением численного интегрирования, ведет к недопустимо большому расчетному времени, что снижает эффективность использования современных высокопроизводительных установок динамического нагружения. В данной работе предлагается в процессе численного интегрирования использовать преобразование Шенкса, применяемое в численном анализе для увеличения скорости сходимости последовательностей. Показано, что совместное применение преобразования Шенкса, асимптотических замен и распараллеливание процесса вычислений помогает уменьшить расчетное время более чем на порядок.*

***Ключевые слова:** нежесткие дорожные одежды, обратный расчет, модуль упругости, чаша прогибов, преобразование Шенкса*

**A.V. Bochkarev, A.I. Zemlyanukhin**

## REVERSE CALCULATION OF ELASTIC MODULI OF PAVEMENT LAYERS

***Abstract.** With the adoption of GOST R 59918-2021, assessment of strength of the multi-layered pavements should be accompanied by calculation of the elastic moduli of individual*

*layers. The source of information for solving this problem is the deflection bowl of the pavement surface, determined experimentally using a dynamic loading facility. The method for determining the elastic moduli of layers along the deflection bowl is regulated by the specified standard and is based on solving the problem of elasticity theory for a multilayer half-space using integral transformations. Computational complexity of the problem associated with multiple numerical integrations leads to an unacceptably long estimate time, which reduces efficiency of modern high-performance dynamic loading devices. In this paper, it is proposed to use the Shanks transformation in the process of numerical integration, which is used in numerical analysis to increase the rate of convergence of sequences. It is shown that combined use of the Shanks transform, asymptotic substitutions, and parallelization of the computational process helps to reduce the estimate time by more than an order of magnitude.*

**Keywords:** *non-rigid pavement, reverse calculation, modulus of elasticity, deflection cup, the Shanks transformation*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Поддержание в рабочем состоянии весьма протяженной сети российских автомобильных дорог является одним из важнейших условий развития экономики нашей страны [1]. Современными нормативными документами дорога рассматривается как нежесткое многослойное сооружение, прочностные свойства которого уменьшаются в процессе эксплуатации под воздействием нагрузки от проходящего транспорта, неблагоприятных воздействий окружающей среды и естественной деградации свойств материалов, составляющих слои дороги [2, 3].

В теории управления качеством известно правило десятикратных затрат, основанное на примерной статистической оценке соотношения затрат на исправление дефектов в зависимости от времени их обнаружения. В частности, устранение дефекта продукции на стадии конструкторской разработки обойдется производителю в среднем в 10 раз дешевле, чем устранение этого дефекта на стадии производства, а стоимость устранения того же дефекта продукта, попавшего к потребителю, возрастает еще на порядок [4]. Это правило универсально и в полной мере относится к эксплуатации дорог.

Своевременное выявление скрытых дефектов, например, растрескивания нижнего слоя асфальтобетонного покрытия от сверхнормативной нагрузки или частичной потери несущих свойств грунтового основания в результате его переувлажнения, позволяет ограничиться мерами, составляющими текущий и средний ремонт дороги. Развитие скрытых дефектов до визуально наблюдаемой стадии, характеризующейся высокой степенью колейности и трещинообразования, может потребовать многократно более дорогого капитального ремонта [5].

Для эффективного выявления скрытых дефектов автомобильных дорог применяют методы неразрушающего контроля, опирающиеся, в числе прочего, на использование установок динамического нагружения. В последнее десятилетие как в России, так и за рубежом, наибольшее распространение получили установки динамического нагружения, измеряющие максимальные вертикальные упругие перемещения поверхности дорожной одежды, вызванные падением специального груза [6]. Жесткость демпферов, отделяющих груз от ударной платформы, передающей усилие непосредственно на поверхность дороги, подобрана таким образом, чтобы форма ударного импульса была близка к синусоидальной при длительности импульса в районе 30 мс. Ударная платформа заканчивается лежащей на поверхности дороги нагрузочной плитой диаметром 30 см. В современных установках нагрузочная плита состоит из нескольких независимых шарнирно подвешенных сегментов, обеспечивающих равномерное нагружение даже при некотором искривлении плоскости поверхности дороги [7]. Изменение высоты падения груза позволяет устанавливать необходимую амплитуду ударного импульса для дорожных одежд любых категорий. Амплитуда и длительность ударного импульса вместе с диаметром нагрузочной плиты призваны имитировать нагрузку, передаваемую на дорожную одежду колесом движущегося грузового автомобиля.

В состав установки динамического нагружения входит горизонтальная балка с акселерометрами (датчиками перемещений), прикрепленными к ней на некоторых стандартных расстояниях от центра нагрузочной плиты. В ходе проведения испытаний чувствительные элементы акселерометров прижимаются к поверхности дороги и позволяют записать зависимости ускорений точек поверхности, соответствующих положениям акселерометров, от времени. Двукратное численное интегрирование этих зависимостей, осуществляемое специальным программным обеспечением, позволяет восстановить вертикальные перемещения точек поверхности дороги, вызванные прохождением через эти точки упругой волны в результате падения груза. Для анализа прочности дорожной одежды используются максимумы измеренных вертикальных перемещений.

До последнего времени анализ прочности осуществлялся путем определения общего модуля упругости дорожной одежды [8], для вычисления которого достаточно знать показания одного датчика перемещений, расположенного в центре нагрузочной плиты. Эта задача легко решается при помощи известной в теории упругости формулы расчета статического прогиба однородного упругого полупространства, нагруженного равномерно распределенной в круге нагрузкой, и формулы пересчета динамического отклика к статическому. С принятием ГОСТ Р 59918-2021 [9] анализ прочности требует определения модулей упругости для каждого из слоев дорожной одежды. Математическая постановка и алгоритм решения этой задачи регламентируются обязательным к применению приложением В упомянутого ГОСТа.

## ПОСТАНОВКА ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ

Математическая постановка включает следующие гипотезы:

- слои дорожной одежды считаются линейно-упругими, однородными и не имеющими нарушений сплошности в форме трещин или разрывов; каждый из слоев имеет постоянную толщину; нижний слой, соответствующий грунтовому основанию, представляется неограниченным полупространством;
- к внешней поверхности верхнего слоя, соответствующего асфальтобетонному покрытию, прикладывается импульс нормального давления, равномерно распределенного по кругу радиуса  $R_0$ ; зависимость давления от времени  $p(t)$  считается известной;
- каждый слой характеризуется постоянными значениями толщины  $H$ , модуля упругости  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$  и плотности  $\rho$ , не зависящими от времени, уровня нагрузки, температуры и влажности.
- деформации материала слоев считаются малыми.

В рамках перечисленных гипотез формулируется динамическая осесимметричная линейная задача теории упругости в перемещениях для многослойного полупространства. Пусть для определенности полупространство включает 4 слоя: 1-й верхний слой соответствует асфальтобетонному покрытию, 2-й – основанию, 3-й – дополнительному основанию и 4-й – земляному полотну. Вводится цилиндрическая система координат с началом в центре круга приложения нагрузки, ось  $Or$  которой направлена параллельно слоям, а ось  $Oz$  – перпендикулярно (рис. 1).

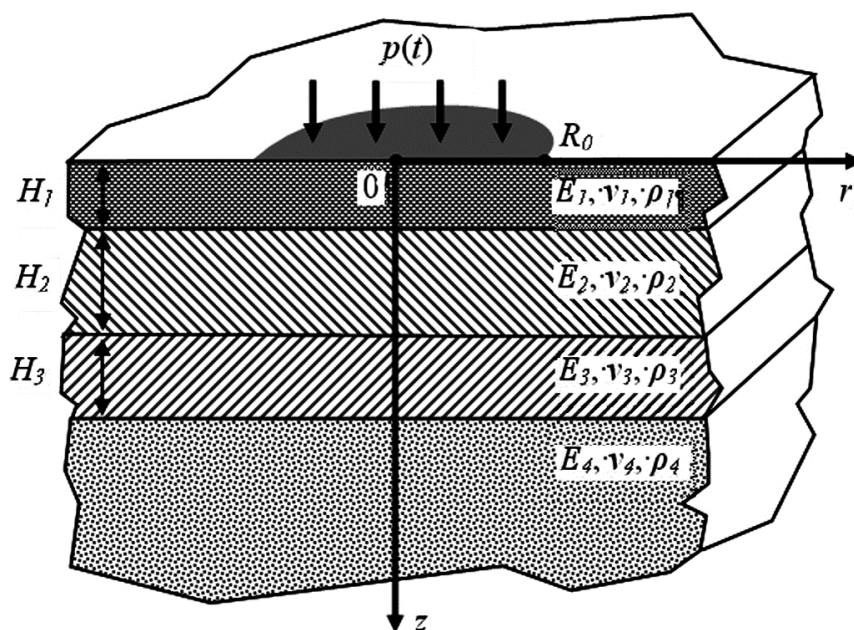


Рис. 1. Схема расположения слоев полупространства

Считается, что движение каждой точки полупространства подчиняется уравнению Ламе [10]

$$(\lambda_k + 2\mu_k) \text{grad div } \vec{u}^{(k)} - \mu_k \text{rot rot } \vec{u}^{(k)} = \rho_k \frac{\partial^2 \vec{u}^{(k)}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где  $\vec{u}^{(k)} = u_r^{(k)}(r, z, t) \vec{e}_r + u_z^{(k)}(r, z, t) \vec{e}_z$  – вектор перемещений точки  $k$ -го слоя с координатами  $r, z$  в момент времени  $t$ ;  $\vec{e}_r, \vec{e}_z$  – орты осей  $Or$  и  $Oz$ , соответственно;  $\lambda_k, \mu_k$  – параметры Ламе  $k$ -го слоя, связанные с его модулем упругости и коэффициентом Пуассона зависимостями

$$\lambda_k = \frac{\nu_k E_k}{(1 + \nu_k)(1 - 2\nu_k)}, \quad \mu_k = \frac{E_k}{2(1 + \nu_k)}. \quad (2)$$

Граничные условия на верхней поверхности 1-го слоя: нормальное напряжение  $\sigma_z$  в круге приложения нагрузки принимается равным приложенному давлению  $p(t)$ , касательное напряжение  $\tau_{rz}$  всюду принимается равным нулю:

$$\begin{aligned} \sigma_z^{(1)} \Big|_{z=0} &\equiv (\lambda^{(1)} + 2\mu^{(1)}) \frac{\partial u_z^{(1)}}{\partial z} + \lambda^{(1)} \left( \frac{\partial u_r^{(1)}}{\partial r} + \frac{u_r^{(1)}}{r} \right) = \begin{cases} p(t), & r \leq R_0 \\ 0, & r > R_0, \end{cases} \\ \tau_{rz}^{(1)} \Big|_{z=0} &\equiv \mu^{(1)} \left( \frac{\partial u_r^{(1)}}{\partial z} + \frac{\partial u_z^{(1)}}{\partial r} \right) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Условия контакта между слоями в отсутствие взаимного проскальзывания предполагают непрерывность вертикального перемещения  $u_z$ , радиального перемещения  $u_r$ , нормального напряжения  $\sigma_z$  и касательного напряжения  $\tau_{rz}$  при переходе от  $k$ -го слоя к  $(k+1)$ -му слою:

$$\begin{aligned} z = H_1 : & \quad u_r^{(1)} = u_r^{(2)}, \quad u_z^{(1)} = u_z^{(2)}, \quad \sigma_z^{(1)} = \sigma_z^{(2)}, \quad \tau_{rz}^{(1)} = \tau_{rz}^{(2)}; \\ z = H_1 + H_2 : & \quad u_r^{(2)} = u_r^{(3)}, \quad u_z^{(2)} = u_z^{(3)}, \quad \sigma_z^{(2)} = \sigma_z^{(3)}, \quad \tau_{rz}^{(2)} = \tau_{rz}^{(3)}; \\ z = H_1 + H_2 + H_3 : & \quad u_r^{(3)} = u_r^{(4)}, \quad u_z^{(3)} = u_z^{(4)}, \quad \sigma_z^{(3)} = \sigma_z^{(4)}, \quad \tau_{rz}^{(3)} = \tau_{rz}^{(4)}. \end{aligned} \quad (4)$$

При  $z \rightarrow \infty$  напряжения и перемещения отсутствуют. В качестве начальных условий считается, что при  $t = 0$  перемещения и скорости точек многослойной среды равны нулю.

**Прямая задача:** по заданным значениям толщин  $H_k$ , модулей упругости  $E_k$ , коэффициентов Пуассона  $\nu_k$ , плотностей  $\rho_k$  слоев, радиуса  $R_0$  круга приложения нагрузки и функции зависимости давления от времени  $p(t)$  вычислить максимальные вертикальные перемещения  $\max_t u_z(r_i, t)$  поверхности многослойной среды на расстояниях  $r_i$ , соответствующих положениям датчиков перемещений.

**АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ**

Равенства (1)-(4) образуют начально-граничную задачу для системы из 4 связанных уравнений в частных производных, искомые величины  $u_r^{(k)}, u_z^{(k)}, k=1..4$  которой являются функциями трех независимых переменных  $r, z, t$ . Упростить решение задачи может помочь понижение ее размерности, иными словами, уменьшение количества независимых переменных. Для этого, во-первых, из временной области переходят в частотную, раскладывая периодическое продолжение функции изменения давления  $p(t)$  в ряд Фурье

$$p(t) = \sum_{k=-M}^M F_k e^{i\omega_k t}, \quad (5)$$

где  $\omega_k = k\pi / (t_{umh} + \Delta t)$ . Здесь  $t_{umh} \approx 30$  мс обозначает длительность импульса нагрузки,  $\Delta t$  – задержка между двумя последовательными импульсами, достаточная для затухания переходных процессов. Соответственно, импульс нагрузки с профилем  $p(t)$  заменяется на гармоническую нагрузку с единичной амплитудой и круговой частотой  $\omega$ . От вещественных функций перемещений  $u_r(r, z, t), u_z(r, z, t)$  переходят к комплексным амплитудам перемещений  $U_r(r, z), U_z(r, z)$ , зависящим только от двух переменных:

$$u_r(r, z, t) = \text{Re}[U_r(r, z) e^{-i\omega t}], \quad u_z(r, z, t) = \text{Re}[U_z(r, z) e^{-i\omega t}]. \quad (6)$$

После этого к уравнениям (1)-(4), записанным для комплексных амплитуд  $U_r(r, z), U_z(r, z)$ , применяют интегральное преобразование Ханкеля [11]

$$U_r(r, z) = \int_0^{+\infty} U(\gamma, z) J_1(r\gamma) \gamma d\gamma, \quad U_z(r, z) = \int_0^{+\infty} W(\gamma, z) J_0(r\gamma) \gamma d\gamma, \quad (7)$$

где  $U(\gamma, z), W(\gamma, z)$  – так называемые трансформанты амплитуд;  $J_0(r\gamma)$  и  $J_1(r\gamma)$  – функции Бесселя 1-го рода нулевого и первого порядков, соответственно;  $\gamma$  – комплексная переменная интегрирования.

Записанные в терминах трансформант, уравнения Ламе (1) принимают вид обыкновенных дифференциальных уравнений, в которых сохраняются производные только по переменной  $z$  (верхний индекс  $\kappa$ , обозначающий номер слоя, опущен):

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \gamma(\lambda + \mu) \frac{\partial W}{\partial z} - [(\lambda + 2\mu)\gamma^2 - \rho\omega^2] U &= 0, \\ (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \gamma(\lambda + \mu) \frac{\partial U}{\partial z} - [\mu\gamma^2 - \rho\omega^2] W &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Общее решение системы (8) имеет вид

$$\begin{aligned}
 U &= P_1(\gamma)e^{-\alpha z} + P_2(\gamma)e^{-\beta z} + P_3(\gamma)e^{\alpha z} + P_4(\gamma)e^{\beta z}, \\
 W &= \frac{\alpha}{\gamma}P_1(\gamma)e^{-\alpha z} + \frac{\gamma}{\beta}P_2(\gamma)e^{-\beta z} - \frac{\alpha}{\gamma}P_3(\gamma)e^{\alpha z} - \frac{\gamma}{\beta}P_4(\gamma)e^{\beta z},
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где введены обозначения

$$\alpha = \sqrt{\gamma^2 - \frac{\rho\omega^2}{\lambda + 2\mu}}, \quad \beta = \sqrt{\gamma^2 - \frac{\rho\omega^2}{\mu}},
 \tag{10}$$

содержит 4 произвольные функции  $P_1(\gamma) - P_4(\gamma)$ . Записывая решение (9) для каждого  $k$ -го слоя, получаем набор из 16 неизвестных функций  $\{P_m^{(k)}(\gamma)\}$ ,  $k=1..4$ ,  $m=1..4$ , для определения которых имеется 16 линейных алгебраических уравнений:

- 2 уравнения, следующие из граничных условий (3):

$$\begin{aligned}
 (\lambda^{(1)} + 2\mu^{(1)})\frac{\partial W^{(1)}}{\partial z} + \lambda^{(1)}\gamma U^{(1)} &= \frac{R_0}{\gamma}J_1(R_0\gamma), \\
 \gamma W^{(1)} - \frac{\partial U^{(1)}}{\partial z} &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

- 12 уравнений, следующих из условий (4) на границах между слоями,
- 2 уравнения, вытекающие из требования нулевых перемещений при  $z \rightarrow \infty$ .

Общее решение этой системы для 4-слойного полупространства оказывается настолько громоздким, что систему приходится решать численно для каждого заданных значений переменных  $\gamma$ ,  $z$  и  $\omega$ . В рассматриваемой задаче нам интересны только вертикальные перемещения  $u_z$  поверхности дорожной одежды, трансформанта которых определяется вытекающим из (9) равенством

$$W(\gamma, 0) = \frac{\alpha}{\gamma}[P_1^{(1)}(\gamma) - P_3^{(1)}(\gamma)] + \frac{\gamma}{\beta}[P_2^{(1)}(\gamma) - P_4^{(1)}(\gamma)].
 \tag{12}$$

Решение для комплексной амплитуды вертикальных перемещений  $U_z(r, z)$  находим с помощью обратного преобразования Ханкеля

$$U_z(r, 0) = \int_0^{+\infty} W(\gamma, 0)J_0(r\gamma)\gamma d\gamma,
 \tag{13}$$

после чего, используя равенства (6), можно записать решение базовой задачи

$$u_z(r, 0, t) = \text{Re}[U_z(r, 0)e^{-i\omega t}].
 \tag{14}$$

Функция  $u_z(r, 0, t)$  есть вертикальное перемещение точки поверхности многослойного полупространства на расстоянии  $r$  от центра приложения гармонической нагрузки

## Информационные технологии и телекоммуникации

с единичной амплитудой и частотой  $\omega$ , в момент времени  $t$ . Чтобы получить решение прямой задачи, воспользуемся принципом суперпозиции: для каждой фиксированной пары значений  $r$  и  $t$ , вычислив  $u_z(r, 0, t)$  для всех частот  $\omega_k$  из разложения (5), сложим их с весовыми коэффициентами  $F_k$  из того же разложения – в результате получим вертикальное перемещение под воздействием импульса нагружения  $p(t)$ :

$$u_z(r, t) = \sum_{k=-M}^M F_k \cdot u_z(r, 0, t) \Big|_{\omega=\omega_k}. \quad (15)$$

Искомые максимальные вертикальные перемещения  $\max_t u_z(r_i, t)$  определяют вычислением значений  $u_z(r_i, t)$  для последовательности моментов времени из отрезка  $[0, t_{\max}]$ , с последующим выбором максимального значения. Ширина отрезка  $t_{\max}$  выбирается с учетом длительности импульса нагружения  $t_{\text{имп}}$  и задержки, связанной с конечной скоростью распространения упругой волны. Набор чисел  $\max_t u_z(r_i, t)$  определяет чашу прогиба дорожной одежды. Стандартно множество  $r_i$  содержит 7 значений от 0 до 1,8 м с шагом 0,3 м. ГОСТ Р 59918-2021 рекомендует дополнить это множество еще тремя значениями 0,2 м, 0,45 м и 2,1 м.

### ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ

Прямая задача состоит в определении чаши прогибов по заданным модулям упругости слоев. Оценка прочностного состояния дорожной одежды требует решения обратной задачи, при которой по известной чаше прогибов, найденной экспериментально, нужно рассчитать модули упругости слоев. Согласно ГОСТ Р 59918-2021 [9], решение обратной задачи сводится к итерационному решению последовательности прямых задач, при котором модули упругости слоев варьируются таким образом, чтобы обеспечить совпадение расчетной и экспериментальной чаш прогиба в пределах заданной погрешности.

Основные вычислительные затраты решения обратной задачи связаны с нахождением интегралов (13). Однократное решение прямой задачи требует вычисление интеграла (13) для всевозможных пар чисел  $\{r_i, \omega_k\}$ ,  $i = 1..10$ ,  $k = 1..M$ , причем для удовлетворительного представления импульса нагружения отрезком ряда Фурье величину  $M$  следует выбирать не меньшей 9. Путь интегрирования в комплексной плоскости переменной интегрирования  $\gamma$  представляется ломаной линией, обходящей особые точки подынтегральной функции (13) (рис. 2).



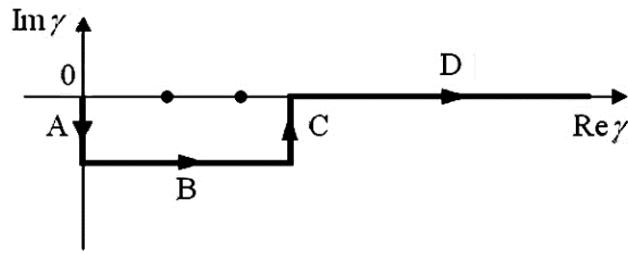


Рис. 2. Форма пути интегрирования выражения (13). Точками обозначено примерное положение вещественных особых точек подынтегральной функции

В силу равенства (11) подынтегральная функция

$$f_{\text{int}} = W(\gamma, 0) J_0(r\gamma) \gamma \tag{16}$$

интеграла (13) содержит произведение функций Бесселя

$$J_0(r\gamma) \cdot J_1(R_0\gamma). \tag{17}$$

и вследствие этого достаточно сложным образом осциллирует (меняет свой знак) на неограниченном участке D пути интегрирования.

Возьмем для дальнейшего анализа конструкцию дорожной одежды из приложения Д рассматриваемого ГОСТа (таблица).

Номер слоя	Материал слоя	Толщина, см	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность слоя, кг/м <sup>3</sup>
1	Асфальтобетон	25	2400	0,35	2400
2	Щебеночно-песчаная-цементная смесь	25	700	0,35	2000
3	Песок	30	120	0,35	1600
4	Грунт-суглинок	–	41	0,35	2000

На рис. 3 показаны графики функции  $f_{\text{int}}(\gamma)$  для нескольких расстояний  $r_i$ , соответствующих положениям датчиков прогиба. Черные точки обозначают нули функции Бесселя  $J_1(R_0\gamma)$ , единые для всех графиков.

Наличие различающихся коэффициентов  $r$  и  $R_0$  в (17) не позволяет вычислить интеграл (13) аналитически – приходится применять численное интегрирование – и здесь возникают сложности с критерием останова вычислений при интегрировании на полубесконечном интервале. Если бы подынтегральная функция являлась знакопостоянной и монотонно убывающей, то для останова вычислений подходило бы выполнение простейшего условия  $f_{\text{int}} < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – достаточно малое число. Но для быстро осциллирующих функций, график которых многократно пересекает ось абсцисс, такое условие не годится.

Разобьем (13) на сумму интегралов по отрезкам, заключенным между соседними нулями  $\gamma_k$  функции Бесселя  $J_1(R_0\gamma)$ :

$$\int_0^{+\infty} f_{\text{int}} d\gamma = \sum_{k=1}^{\infty} \int_{\gamma_k}^{\gamma_{k+1}} f_{\text{int}} d\gamma = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \quad (18)$$

и построим на рис. 4 графики последовательных значений частичных сумм ряда (18)

$$S_1 = a_1, S_2 = a_1 + a_2, S_3 = a_1 + a_2 + a_3, \dots \quad (19)$$

соответствующие графикам на рис. 3.

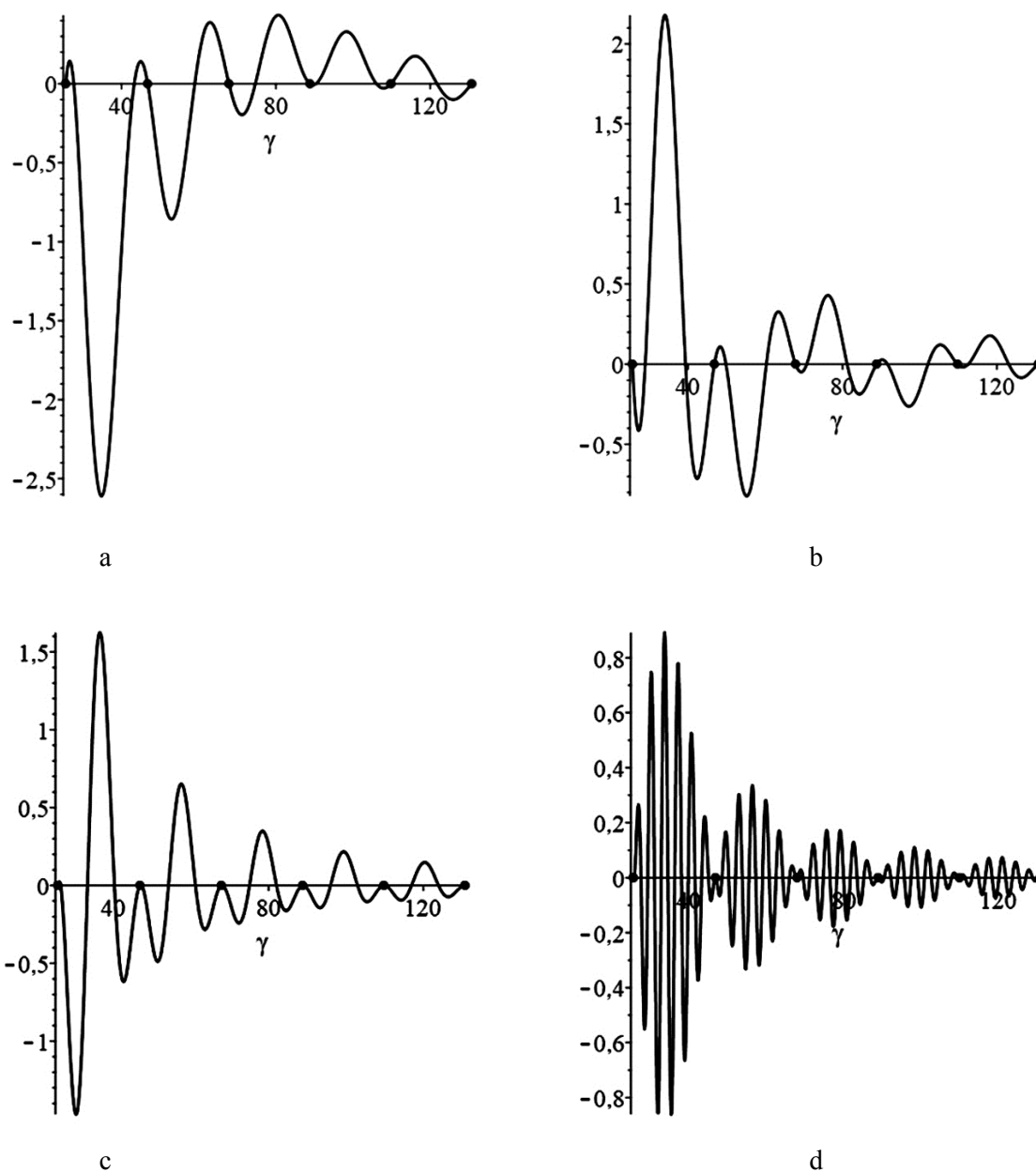


Рис. 3. Примеры графиков функции (16) (масштаб по вертикали получен умножением на  $10^7$ ):

a)  $r = 0,2m$ , b)  $r = 0,3m$ , c)  $r = 0,45m$ , d)  $r = 1,8m$

Визуально последовательности частичных сумм на рис. 4 можно отнести к сходящимся, но имеющиеся осцилляции не позволяют с достаточной точностью приблизить сумму ряда (18) даже при вычислении  $S_{20}$ . Несмотря на использование на каждом отрезке  $[\gamma_k, \gamma_{k+1}]$  высокоэффективной составной формулы интегрирования Симпсона [12], вычисление частичных сумм  $S_n$  высоких порядков  $n$  отнимает слишком много времени. Для ускорения сходимости предлагается применить к последовательности  $S_n$  преобразование Шенкса.

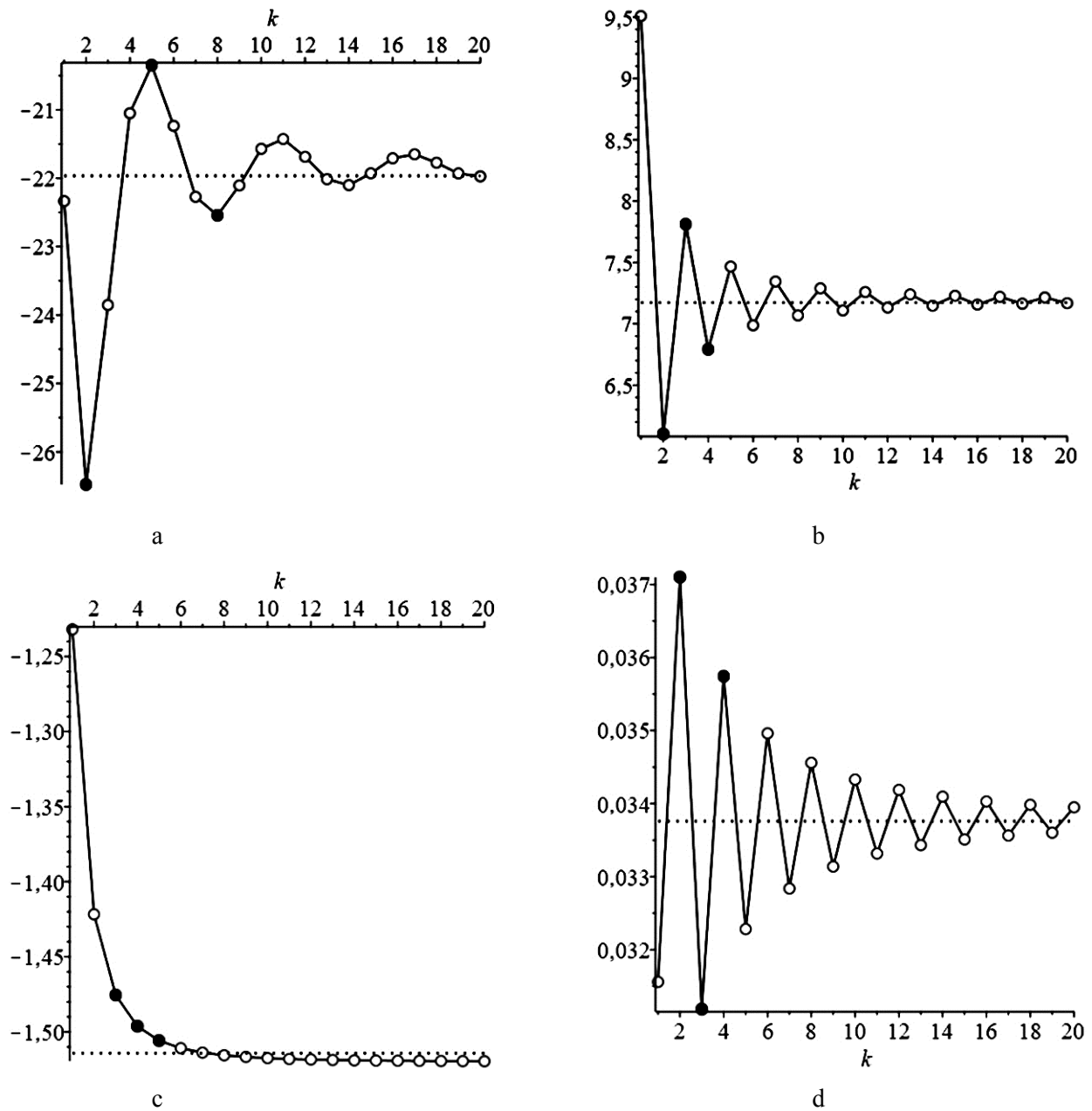


Рис. 4. Графики частичных сумм (19) (масштаб по вертикали получен умножением на  $10^7$ ):

a)  $r = 0,2m$ , b)  $r = 0,3m$ , c)  $r = 0,45m$ , d)  $r = 1,8m$

**УСКОРЕНИЕ СХОДИМОСТИ  
ПРИ ПОМОЩИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ШЕНКСА**

Д. Шенкс предложил заменять медленно сходящуюся последовательность чисел  $S_1, S_2, S_3, \dots$  новой последовательностью  $S_1^*, S_2^*, S_3^*, \dots$ , полученной нелинейным преобразованием [13]

$$S_n^* = \frac{S_{n+2}S_n - S_{n+1}^2}{S_{n+2} - 2S_{n+1} + S_n}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (20)$$

Для монотонных последовательностей (рис. 4с) и «пилообразных» последовательностей (рис. 4b, 4d) сумма ряда (18) с достаточной точностью приближается значением  $S_2^*$  или  $S_3^*$ . Последовательность с плавным волнообразным изменением (рис. 4а) суммировать сложнее. В последнем случае к хорошим результатам приводит переход к «пилообразной» последовательности путем отбрасывания тех членов, которые не находятся в точках локального экстремума. На каждом из графиков рис. 4а-d три закрашенных кружка соответствуют членам исходной последовательности  $S_n$ , использованным при вычислении по формуле (20) приблизительной оценки  $S_n^*$  суммы ряда (18); эта оценка показана на каждом графике пунктирной линией и ее погрешность не превосходит 1 %. При необходимости уменьшить эту погрешность можно двумя способами: вместо оценок  $S_2^*$  или  $S_3^*$  использовать оценки более высоких порядков, например  $S_4^*$  или применить преобразование Шенкса к последовательности 1-го уровня  $S_1^*, S_2^*, S_3^*, \dots$  с тем, чтобы использовать оценку 2-го уровня  $S_2^*$ .

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Метод решения обратной задачи по определению модулей упругости слоев дорожной одежды на основе экспериментально измеренной чаши динамического прогиба, предлагаемый в новом ГОСТ Р 59918-2021, математически и вычислительно весьма непросто, и может применяться на практике только при условии создания специального программного комплекса. Метод в процессе поиска оптимальных значений модулей предполагает многократное решение прямой задачи теории упругости для многослойного полупространства. Основные вычислительные ресурсы при решении прямой задачи затрачиваются при проведении обратного преобразования Ханкеля по формуле (13). Каждое вычисление значения подынтегральной функции из правой части (13) требует решения системы 16 линейных алгебраических уравнения для определения величин  $\{P_m^{(k)}(\gamma)\}$ , входящих в функцию  $W(\gamma, 0)$ , а также вычисление значений функций Бесселя  $J_0(r\gamma)$  и  $J_1(R_0\gamma)$ . Процесс поиска оптимальных значений модулей упругости слоев требует не менее 100 решений прямой задачи; численное

интегрирование в комплексной плоскости по траектории рис. 2 вынуждает вычислять подынтегральную функцию в среднем для 300 значений переменной  $\gamma$ ; как указывалось выше, разложение импульса нагружения в ряд Фурье при наличии 10 датчиков перемещений требует вычисления интеграла (13) по крайней мере  $9 \cdot 10 = 90$  раз. Таким образом, в ходе решения обратной задачи происходит примерно  $100 \cdot 300 \cdot 90 = 2,7 \cdot 10^6$  вычислений значений подынтегральной функции (13). Без дополнительной оптимизации программного кода этот процесс занимает до 5-10 минут работы современного компьютера на базе процессора AMD Ryzen 5 5600. Современные высокопроизводительные установки динамического нагружения на однократное измерение чаши прогиба затрачивает всего 30-40 секунд. Поэтому достижение приемлемого времени решения обратной задачи критически важно для возможности проведения интенсивной диагностики состояния слоев дорожных одежд в течение всей рабочей смены установки и получения результатов на месте, без выполнения отложенных вычислений. Отметим, что применение асимптотических упрощений для функций Бесселя вместе с преобразованием Шенкса, а также распараллеливание вычислений позволило нам сократить расчетное время обратной задачи до 25-40 секунд без снижения точности вычислений.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Национальный проект «Безопасные качественные дороги». URL: <https://bkdrf.ru/>
2. СТО АВТОДОР 2.4-2013. Оценка остаточного ресурса нежестких дорожных конструкций автомобильных дорог Государственной компании «Российские автомобильные дороги». Москва, 2013.
3. СТО АВТОДОР 10.6-2015. Комплексный динамический мониторинг нежестких дорожных одежд. Правила проведения. Москва, 2015.
4. Управление качеством процессов и продукции: в 3 кн. Кн. 1. Введение в системы менеджмента качества процессов в производственной, коммерческой и образовательной сферах: учеб. пособие / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, Е.С. Мищенко и др. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 240 с.
5. Оценка надежности дорожной одежды на стадии эксплуатации / А.Н. Тиратурян, А.А. Симакова, И.В. Бодров, М.В. Фарниева // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4 URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4509>
6. Углова Е.В., Тиратурян А.Н. Оценка прочности нежестких дорожных одежд. Опыт применения установки динамического нагружения FWD PRIMAX на участках автомобильной дороги М-4 «Дон» // Дорожная держава. 2014. № 57. С. 55.
7. Система измерения прочности дорожных одежд «Дина-4». URL: <http://sdtech.ru/store/lab/trassa/dina-3m.html>

8. ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200015514>

9. ГОСТ Р 59918-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Методики оценки прочности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181995>

10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости. Москва: Наука, 1987. 248 с.

11. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. Москва: Физматгиз, 1961. 524 с.

12. Kalambet Y., Kozmin Yu., Samokhin A. Comparison of integration rules in the case of very narrow chromatographic peaks // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2018. Vol. 179. P. 22-30. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2018.06.001>

13. Шенкс Д. Нелинейное преобразование расходящихся и медленно сходящихся последовательностей // Журнал математики и физики. 1955. Т. 34. С. 1-42.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Бочкарев Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Andrey V. Bochkarev** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Applied Mathematics and System Analysis, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Землянухин Александр Исаевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика и системный анализ» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Alexander I. Zemlyanukhin** – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head: Department of Applied Mathematics and System Analysis, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 25.07.2022, принята к опубликованию 30.08.2022*

**В.В. Горбунов, А.М. Карпеев, А.А. Игнатьев**

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ РОЛИКОВ БУКСОВЫХ ПОДШИПНИКОВ**

*Аннотация.* Рассматривается конструкция, применение и технические характеристики автомата модели ВГ НК-Р.01 для вихретокового контроля роликов буксовых подшипников железнодорожного транспорта.

*Ключевые слова:* вихретоковый метод, ролики подшипников, автомат для контроля, автоматическая калибровка чувствительности датчика

**V.V. Gorbunov, A.M. Karpeev, A.A. Ignatiev**

## **AUTOMATED EDDY CURRENT CONTROL OF AXLE ROLLER BEARINGS**

*Abstract.* The design, application and technical characteristics of the automatic machine model IP NK-R.01 for eddy current control of rollers to axle bearings for the railroad transport are considered.

*Keywords:* eddy current method, bearing rollers, automatic control, automatic calibration of sensor sensitivity

### **ВВЕДЕНИЕ**

В подшипниковом производстве вихретоковый контроль применяется для автоматизированного выявления дефектов в шлифованном поверхностном слое колец и роликов, приводящих к образованию локальных очагов разрушения рабочих поверхностей [1-3]. При этом предусматривается возможность идентификации локальных неоднородностей, включающей определение вида дефекта и его размеров [4, 5]. Это обеспечивает в рамках системы мониторинга технологического процесса (СМТП) не только разбраковку деталей, но и корректировку процесса шлифования, что существенно повышает качество деталей и изготовленных подшипников [6].

При серийном производстве предотвращение выпуска подшипников с критическими дефектами рабочих поверхностей обеспечивается применением автоматов вихретокового контроля, встраиваемых в автоматические линии по производству деталей подшипников. Автоматы имеют соответствующие метрологические характеристики, количественные значения которых определяются при калибровке. Настройку и калибровку средств вихретокового контроля деталей подшипников рекомендуется проводить метрологическими средствами, к которым относятся образцы с искусственными дефектами в виде прямоугольных прорезей с соответствующими параметрами: глубина, ширина, длина при отношении сигнал-шум вихретоковых преобразователей не менее двух [7]. Например, в соответствии с техническими требованиями Европейского стандарта EN 12080 «Транспорт железнодорожный. Буксы. Подшипники качения», применяемым на европейских предприятиях – производителях буксовых подшипников, в том числе локализованных в РФ, предусмотрен сплошной автоматизированный контроль поверхностного слоя деталей вихретоковым методом. В современном производстве подшипников на ряде предприятий (ОАО «ЕПК Саратов», ООО «Средневожжский подшипниковый завод» (г. Самара) и других) применяют автоматизированное вихретоковое оборудование, которое позволяет достоверно выявлять критические дефекты, не допускаемые стандартом EN 12080.

Выполненные с участием ученых СГТУ имени Гагарина Ю.А. исследования методов и средств неразрушающего контроля [3, 6, 9] стали основой для разработки и внедрения ряда приборов и автоматов для вихретокового контроля деталей подшипников. В работающем и проектируемом оборудовании для отображения состояния поверхностного слоя предусматривается формирование сканограмм – вихретоковых образов контролируемых поверхностей, используемых для визуального выявления и идентификации дефектов. Универсальный автоматизированный прибор ПВК-К2М и методика выполнения измерений с его применением включены в Государственные метрологические реестры и позволяют с нормированной точностью оценивать размеры дефектов шлифованных поверхностей и определять их вид для колец различных типоразмеров.

Практический интерес представляет применение вихретокового метода в автоматах для сплошного контроля роликов буксовых подшипников. Результатом его применения является отсортировка всех деталей, для которых сигнал вихретокового датчика от неоднородности поверхностного слоя превышает сигнал, аналогичный сигналу от прямоугольной прорези с номинальными параметрами: шириной 0,05 мм, глубиной 0,05 мм и длиной 3 мм [8].

### **ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТА КОНТРОЛЯ РОЛИКОВ**

При изготовлении и ремонте буксовых подшипников применяются специальные приборы и автоматы [5]. В ООО «Реновация» (г. Санкт-Петербург) разработан автомат



вихретокового контроля роликов модели ВГ НК-Р.01, предназначенный для выявления и измерения глубины поверхностных дефектов роликов, входящих в состав подшипников 42726, применяемых в буксовых узлах железнодорожного подвижного состава.

Автомат, показанный на рис. 1, содержит автоматическое загрузочное устройство, шаговый транспортер и накопитель проверенных роликов. По ходу транспортера размещены демагнетизатор с вращающимися постоянными магнитами, первая станция сканирования роликов, устройство разворота роликов, вторая станция сканирования роликов, сортировочное устройство и накопитель рассортированных роликов. На каждой из двух станций сканируются половина длины и один торец каждого ролика. Автомат оснащен шаговыми электроприводами вращения роликов и линейного перемещения сканеров. Транспортер и механизмы подвода и отвода датчиков оснащены пневматическими приводами. Управление приводами осуществляется программируемым логическим контроллером (ПЛК), обработка измерительной информации и визуализация результатов измерений – персональным компьютером (ПК).

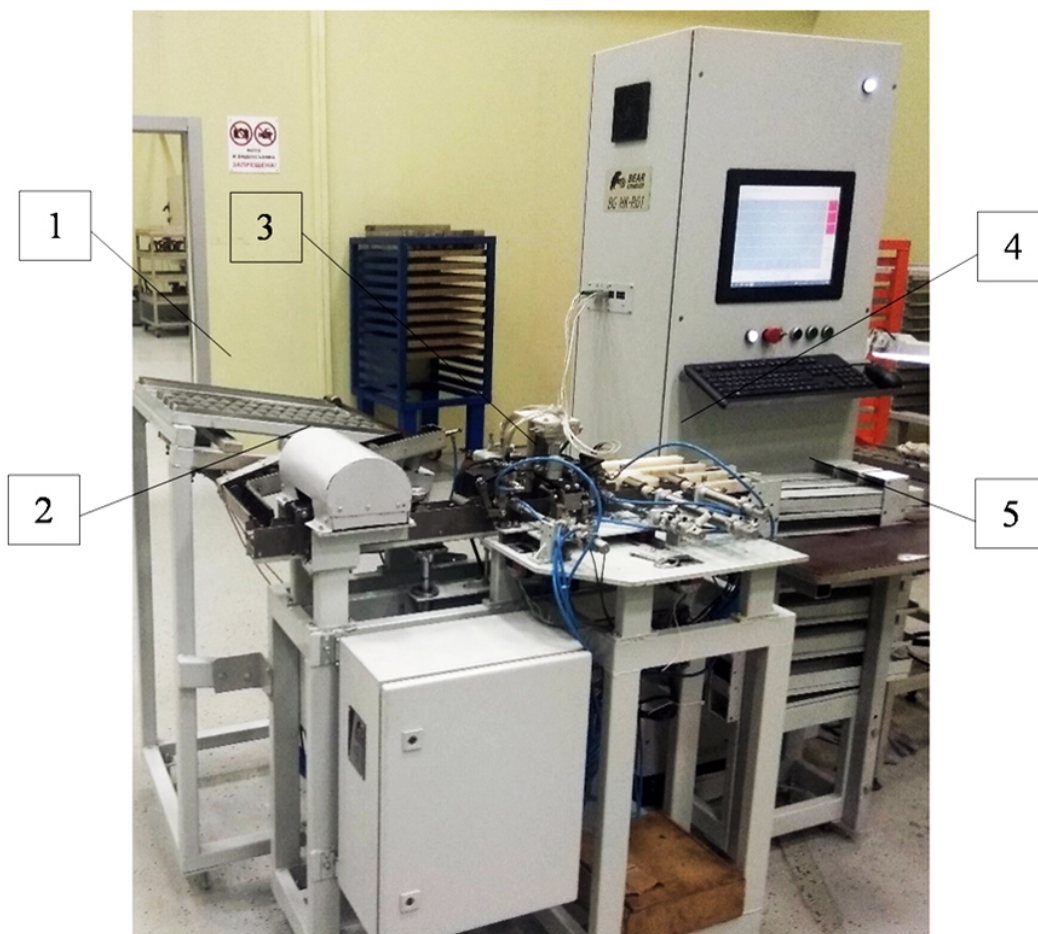


Рис. 1. Автомат вихретокового контроля роликов мод. ВГ НК-Р.01, где: 1 – загрузочное устройство; 2 – демагнетизатор; 3 – станция сканирования; 4 – сортировочное устройство; 5 – накопитель рассортированных роликов

## Информационные технологии и телекоммуникации

В режиме работы автомата «Наладка» результаты измерений представляются в виде разверток сканируемых поверхностей, на которых яркостью отображается величина сигналов датчиков (рис. 2). Доступны также графики сигналов за любой выбранный оборот ролика.

Глубина дефектов – амплитуда сигнала – отображается встроенным цифровым индикатором в указанной курсором точке развертки или графика. В режиме работы «Автомат» превышение заданной величины сигнала в области определенных размеров, приводит к тому, что ролик определяется как бракованный.

Программное обеспечение автомата (ПО) содержит программу обработки сигналов вихретоковых преобразователей «HROT» и программу управления приводами сканеров «SCAN».

ПО реализует следующие метрологически значимые функции:

- конфигурирование параметров функционирования исполнительных устройств и обмен данными компьютера и ПЛК;
- конфигурирование параметров обработки, чтение и обработка данных с вихретокового преобразователя, сохранение данных в файл.

Идентификация программ «HROT» и «SCAN» осуществляется проверкой соответствия «контрольных сумм», указанным в паспорте автомата. «Контрольная сумма» загруженной в ПЛК версии программы «SCAN» проверяется при подключении к ПЛК через программный пакет «CODE SYS».

Защита программного обеспечения от несанкционированного доступа осуществляется средствами операционной системы Windows 10 Professional. От несанкционированных изменений настраиваемые параметры сканирования и обработки измерительной информации защищены паролем.

Технические и метрологические и характеристики автомата мод. ВГ НК-Р.01 для контроля роликов

Наименование показателя	Значение
<b>Производительность автомата, шт./мин</b>	10
<b>Выявляемые дефекты:</b> – трещины, в том числе подповерхностные – пятна несоответствующей структуры и напряженно-деформированного состояния металла	–
<b>Метрологические характеристики</b> (при использовании мер с искусственными дефектами): – диапазон измерения глубины искусственных дефектов, мм – пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения глубины, мм	0,03-0,08 ±0,02

Для проверки метрологических характеристик автомата (таблица) применяются меры с искусственными дефектами в виде пар тонких прорезей различной глубины. На рис. 2 показан пример калибровки автомата с применением указанных мер. Калибровка автомата состоит в сканировании на автомате меры и настройке автомата так, чтобы показания глубины каждого из двух искусственных дефектов соответствовали их действительной глубине.

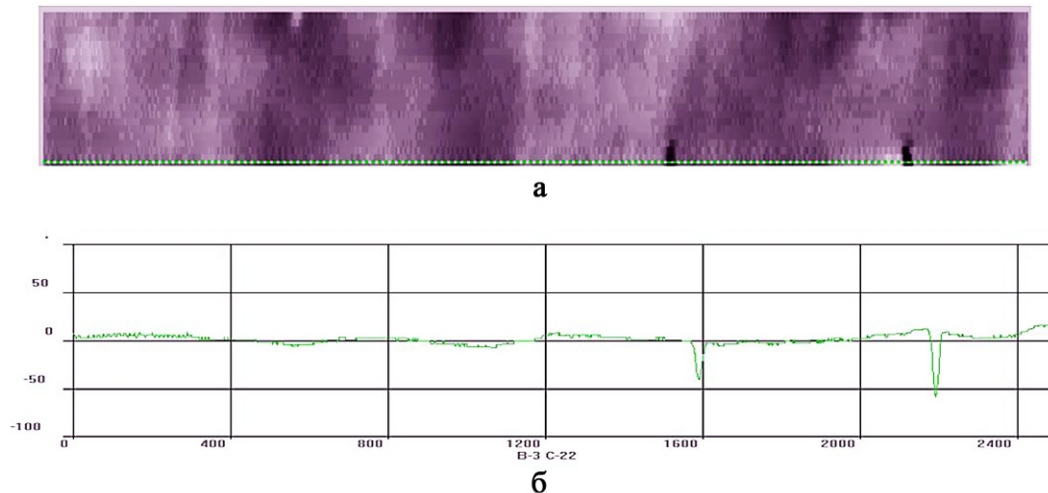


Рис. 2. Сканограммы контроля цилиндрической поверхности ролика: а – развертка контролируемой поверхности (С-скан); б – график сигнала за один оборот ролика (А-скан)

По сканограмме на рис. 2а можно идентифицировать искусственные дефекты на фоне других неоднородностей поверхности. Это нужно для однозначной связи всплесков сигнала вихретокового преобразователя с искусственными дефектами. Показанный на рис. 2,б график сигнала позволяет при калибровке приводить показания глубины дефектов в соответствие действительной глубине, а при контроле деталей измерять глубину отдельных дефектов и в целом глубину дефектного слоя на контролируемой поверхности.

Цифровая фильтрация сигналов вихретоковых преобразователей и распознавание образов дефектов выполняется с применением разработанных алгоритмов и соответствующего программно-математического обеспечения [6, 9]. Такой подход позволяет выявлять признаки дефектов в сигналах, зашумленных некритической неоднородностью поверхностного слоя контролируемых деталей.

### **КАЛИБРОВКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЗАЗОРА**

Во всех известных средствах вихретокового контроля с накладными датчиками проявляется зависимость чувствительности датчиков от зазора между контролируемой поверхностью и чувствительным элементом датчика (далее – измерительный зазор)

[2, 10]. В свою очередь, измерительный зазор зависит от изменения размеров контролируемых изделий. На деталях подшипников должны выявляться микротрещины, глубина и ширина которых составляет десятки микрометров. В условиях селективной сборки подшипников размеры поверхностей качения могут изменяться на 0,2...0,4 мм. Это существенно сказывается на достоверности результатов контроля [11, 12].

Актуальная задача – разработка системы автоматической калибровки чувствительности к дефектам и стабилизация зазора при автоматическом контроле изделий непостоянных размеров в производственном потоке.

Проведены предварительные исследования для разработки системы автоматического регулирования с обратной связью, содержащей датчики и преобразователи сигналов датчиков, устройства для анализа получаемой измерительной информации и исполнительные устройства. Накладной вихретоковый датчик представляет собой намотанную на ферритовом сердечнике катушку с параллельно подключенным конденсатором, размещаемую вблизи контролируемой поверхности. Вихретоковый преобразователь преобразует резонансную частоту датчика в цифровую форму. На выходе преобразователя сигнал, в частотном спектре которого содержатся составляющие, связанные с зазором – низкочастотные составляющие, а также высокочастотные составляющие, связанные с неоднородностями поверхностного слоя типа трещин и локальных пятен [13].

Анализ частотного спектра сигналов вихретокового преобразователя выполняется компьютером с соответствующим программным обеспечением. Исполнительное устройство – шаговый микропривод для перемещения датчика в направлении контролируемой поверхности.

Способ автоматической калибровки чувствительности к дефектам и стабилизации измерительного зазора поясняется на рис. 3.

Датчики 1 расположены вблизи цилиндрической и торцевой поверхностей контролируемого ролика. Датчики закреплены на сканерах, оснащенных линейным шаговым приводом 2. Датчики подключены к преобразователю 3, сигнал с выхода преобразователя поступает в компьютер 4, который формирует команды на осуществление перемещений датчиков в систему управления приводами 5.

Алгоритм калибровки чувствительности датчика состоит в следующем (рис. 4):

1. Подвести датчик в предварительно заданное положение.
2. Измерить амплитуду сигнала от образцового дефекта на ролике определенного диаметра.
3. Если амплитуда сигнала больше заданной величины, то отвести датчик от ролика так, чтобы значение амплитуды стало равно заданному. Если значение амплитуды сигнала меньше заданного, то подвести датчик.

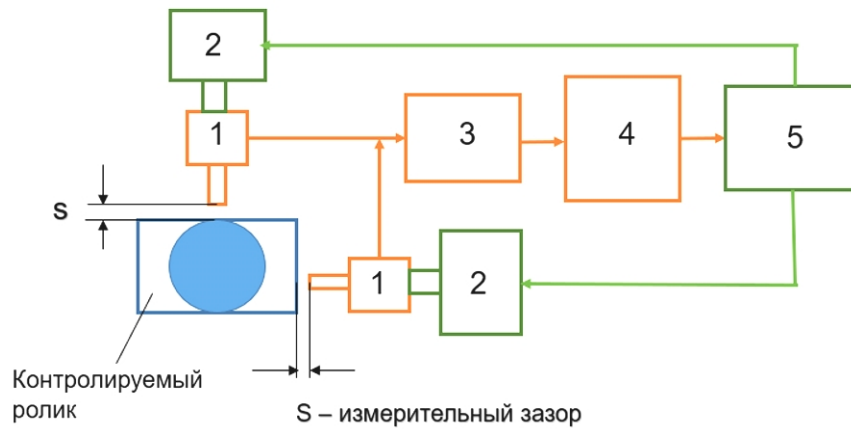


Рис. 3. Структурная схема системы автоматической калибровки и стабилизации измерительного зазора

### Блок-схема автоматического управления модулем

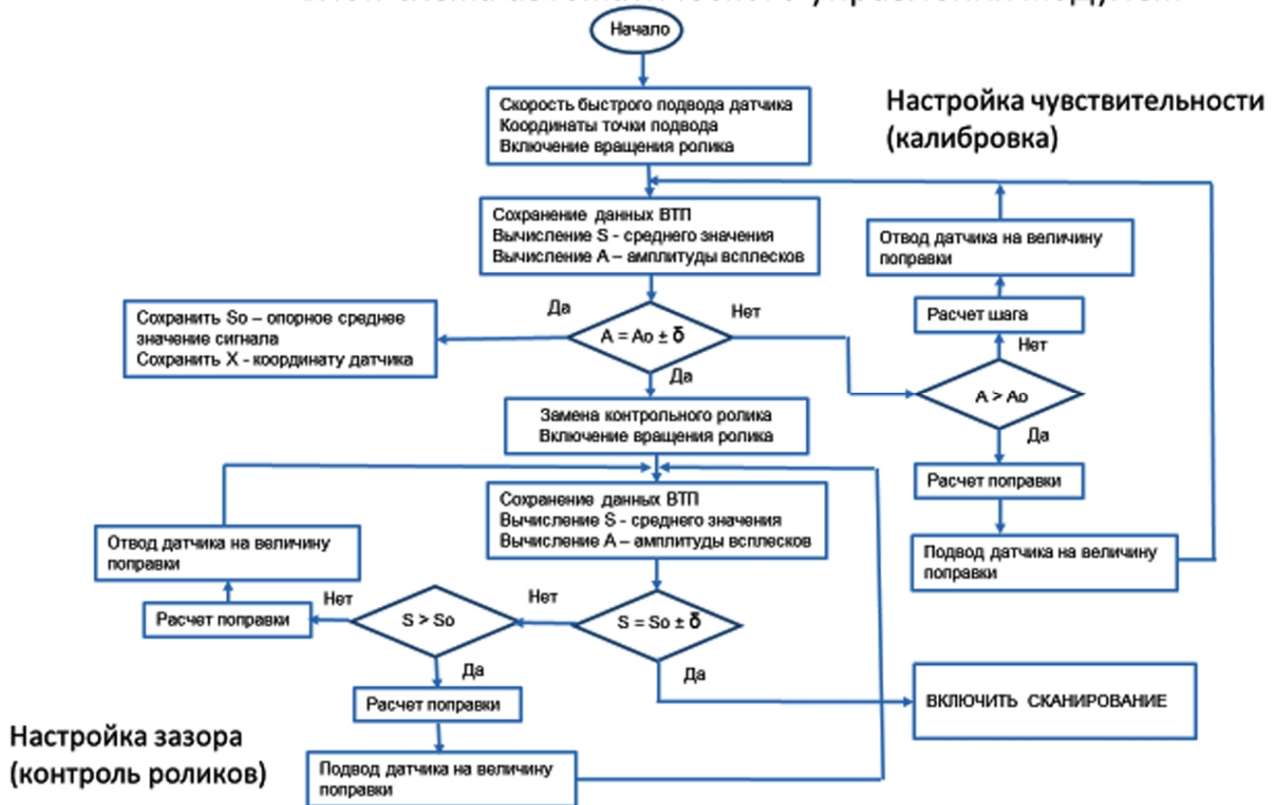


Рис. 4. Алгоритм калибровки чувствительности и настройки измерительного зазора

4. Запомнить величину зазора как разность координат датчика и поверхности ролика, выраженную через среднее значение сигнала. Эта величина зазора, т. е. среднее значение сигнала, должна поддерживаться при контроле роликов, отличающихся по диаметру и длине.

Алгоритм стабилизации измерительного зазора:

1. Измерить среднее значение сигналов за один оборот ролика после подвода датчика к контролируемой поверхности.
2. Если среднее значение больше установленного при калибровке, то отвести датчик от ролика так, чтобы среднее значение стало равно заданному. Если среднее значение меньше заданного, то подвести датчики.
3. Перейти к сканированию.

Примечание. При контроле роликов с криволинейным или ступенчатым профилем положения датчиков должны изменяться по соответствующей программе.

Выполнено экспериментальное исследование зависимости сигнала вихретокового преобразователя от измерительного зазора, результаты которого представлены на рис. 5.



Рис. 5. Зависимость сигнала вихретокового преобразователя от измерительного зазора (сплошной линией показана постоянная составляющая сигнала)

Реальный график отражает изменение сигналов за два оборота изделия. Первому обороту соответствуют отсчеты 1...2500, второму – отсчеты 2501...5000. Увеличение зазора на втором обороте с 0,15 мм до 0,25 мм вызывает увеличение постоянной составляющей сигнала с 101,1 до 104,0 единиц. Одновременно среднее квадратическое отклонение (СКО) уменьшается с 3,06 до 2,54 единицы, т. е. чувствительность датчика к неоднородности поверхностного слоя снижается в 1,2 раза.

Возможность автоматической настройки чувствительности (калибровки) автомата к дефектам поверхностного слоя показана на рис. 6.

На графике показан сигнал вихретокового преобразователя от поверхности контрольного образца с дефектом глубиной 35 мкм. Амплитуда всплеска 35 единиц получена при зазоре 0,33 мм. Этому зазору соответствует среднее значение сигнала, равное 113,5 единиц. Это среднее значение сигнала принимается опорным. Задача системы авто-



матического регулирования зазора – поддерживать опорное значение сигнала при контроле потока роликов для обеспечения одинаковой чувствительности автомата к дефектам. Задача решается предложенным выше алгоритмом стабилизации измерительного зазора.



Рис. 6. График сигнала от поверхности контрольного образца с искусственным дефектом глубиной 35 мкм

На рис. 7 показано устройство для регулирования измерительного зазора.

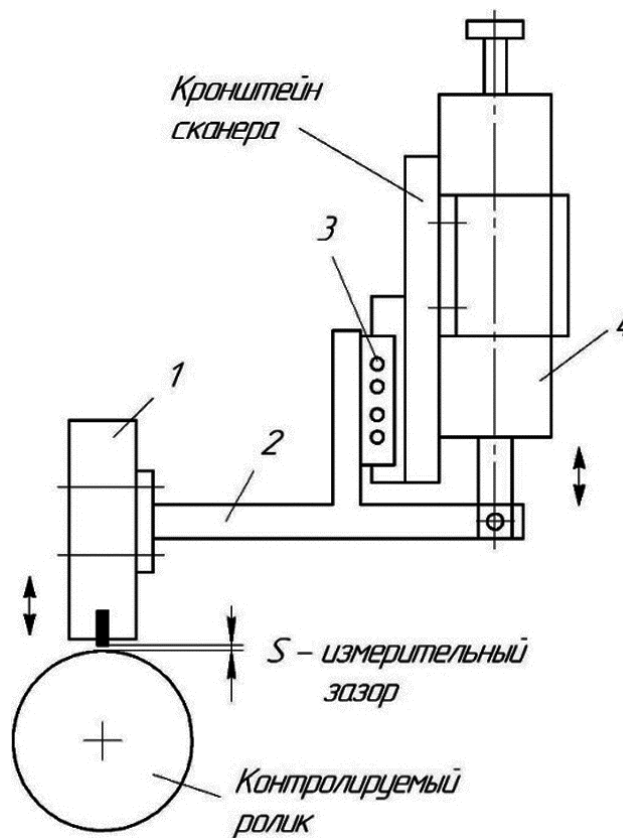


Рис. 7. Устройство регулирования измерительного зазора

Устройство закрепляется на кронштейне сканера, который при работе автомата перемещается в направлении оси контролируемого ролика. На кронштейне установлена шариковая пара рельс-каретка 3. На каретке закреплен кронштейн 2, который приводится в движении линейным шаговым двигателем 4.

На кронштейне 2 закреплен вихретоковый датчик 1. Под управлением компьютера устройство может регулировать измерительный зазор между датчиком и поверхностью ролика, а также отводить датчик во время установки ролика в гнездо, заменяя пневматический привод.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Метрологическое обеспечение автоматизированного вихретокового контроля деталей подшипников требует особого внимания с точки зрения их качества, что обеспечивает, во-первых, резкое снижение брака деталей, во-вторых, поступление на сборку только годных деталей. Этому способствует настройка автомата контроля роликов модели ВГ НК-Р.01 по мерам с искусственными дефектами, а также стабилизация измерительного зазора.

Стопроцентный неразрушающий контроль роликов буксовых подшипников позволяет не только определить качество их рабочих поверхностей, но и проверить эффективность совершенствования технологического процесса и СМТП.

Применением автоматов, настраиваемых по сертифицированным образцам с искусственными дефектами, впервые на практике реализованы положения упомянутого выше Европейского стандарта EN 12080 по неразрушающему контролю бездефектности поверхностей деталей буксовых подшипников.

Рациональное использование автоматизированных вихретоковых методов контроля деталей подшипников, позволяющее повысить надежность и качество продукции, способствует внедрению новых прогрессивных технологических процессов и дает производству экономические преимущества, необходимые для широкого применения подшипниковой продукции в ОАО «РЖД», а также для поставок на европейский рынок.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Федосеенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихретоковый контроль. Москва: Изд. дом «Спектр», 2014. 224 с.

2. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. Москва: Изд. дом «Спектр», 2014. 288 с.

3. Игнатъев А.А., Чистяков А.М., Горбунов В.В. Автоматизированная вихретоковая дефектоскопия деталей подшипников // СТИН. 2002. № 4. С. 17-19.

4. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля. Москва: Спектр, 2010. 256 с.



5. Тяпаев С.В., Снитко Н.Г. Реализация сплошного неразрушающего контроля бездефектности поверхностного слоя деталей в производстве буксовых подшипников для подвижного железнодорожного состава // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 1. С. 35-40.

6. Игнатьев С.А., Горбунов В.В., Игнатьев А.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: СГТУ, 2009. 160 с.

7. Бабаджанов Л.С., Бабаджанова М.Л. Меры и образцы в области неразрушающего контроля. Москва: Стандартинформ, 2007. 160 с.

8. Горбунов В.В., Тяпаев С.В., Карпеева Е.В. Метрологическое обеспечение контроля бездефектности поверхностного слоя в производстве подшипников // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2019. С. 18-28.

9. Игнатьев А.А., Игнатьев М.А. Методы идентификации дефектов шлифованных деталей подшипников при автоматизированном вихретоковом контроле с применением интеллектуальных технологий // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 1 (92). С. 19-35.

10. Дорофеев А.Л., Казаманов Ю.Г. Электромагнитная дефектоскопия. Москва: Машиностроение, 1980. 232 с.

11. Метрологическое обеспечение вихретокового контроля в производстве деталей подшипников / Л.С. Бабаджанов, М.Л. Бабаджанова, В.В. Горбунов, С.В. Тяпаев // Законодательная и прикладная метрология. 2018. № 4. С. 37-43.

12. Метрологическое обеспечение автоматизированного вихретокового контроля деталей подшипников / Л.С. Бабаджанов, М.Л. Бабаджанова, В.В. Горбунов, Т.А. Коряшкина, С.В. Тяпаев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 1. С. 12-18.

13. Горбунов В.В., Карпеев А.М., Игнатьев А.А. Контроль физико-механических свойств поверхностей дорожек качения подшипников для газотурбинных авиационных двигателей вихретоковым методом // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2021. № 3. С. 5-11.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Горбунов Владимир Владимирович** – кандидат технических наук, главный конструктор ООО «Реновация», г. Санкт-Петербург

**Vladimir V. Gorbunov** – PhD (Technical Sciences), Chief Designer of Renovation LLC, St. Petersburg

## **Информационные технологии и телекоммуникации**

---

**Карпеев Андрей Михайлович** –  
студент Московского авиационного  
института (Национального  
исследовательского университета)

**Andrei M. Karpeev** –  
Undergraduate,  
Moscow Aviation Institute  
(National Research University)

**Игнатьев Александр Анатольевич** –  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Техническая механика  
и мехатроника» Саратовского  
государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.

**Alexander A. Ignatiev** –  
Dr. Sci. Tech., Professor  
Department of Technical  
Mechanics and Mechatronics,  
Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 16.05.2022, принята к опубликованию 12.09.2022*

**Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский,  
Е.В. Трегубова, Р.Д. Аль-Карави**

## **ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ МЕРЫ МНОЖЕСТВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ВЫБОРА**

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы применения аппарата нечеткой (неаддитивной) меры множества к решению задач векторной оптимизации при наличии системного усиления ценностей критериев при их совместном исследовании.

*Ключевые слова:* многокритериальная оптимизация, системное взаимодействие, нечеткая мера множества, классы множеств, скаляризация, ранжирование

**E.E. Mirgorodskaya, N.P. Mityashin, Yu.B. Tomashevskiy,  
E.V. Tregubova, R.D. Al-Qarawi**

## **APPLICATION OF A FUZZY SET SYSTEM IN SOLVING MULTIPLE CRITERIA CHOICE PROBLEMS**

*Abstract.* The paper considers the issues related to application of a fuzzy (non-additive) set system used to solve the vector optimization problems under systemic improvement of criteria values when coordinating their research process.

*Keywords:* multicriteria optimization, system interaction, fuzzy set system, set classes, scalarization, ranking

### **ВВЕДЕНИЕ**

В ряде практических задач необходимо учитывать эффект системного взаимодействия критериев. Этот эффект выражается в том, что совместные высокие значения критериев совокупности увеличивают положительный эффект, обеспечение которого предусматривалось введением этих критериев, причем снижение значения одного из критериев совокупности не компенсируется пропорциональным повышением значения любого другого критерия этой же совокупности. Это соответствует известному синергетическому эффекту взаимодействия нескольких факторов, при котором совместное действие этих факторов превосходит простую сумму действий каждого из них. При решении многокритериальных задач

выбора и оптимизации такой эффект часто игнорируется, что может снижать качество получаемого результата.

Впервые эффект системного взаимодействия критериев рассматривал в своих работах М. Сугено [1-4]. Для его учета им был развит аппарат нечеткой меры (НМ) ценности критериев и, в частности, предложена нечеткая  $\lambda$ -мера. Настоящая статья посвящена некоторым вопросам, связанным с распространением указанного подхода на классы критериев, полученных в результате экспертного анализа многокритериальной задачи с целью установления наличия указанного системного взаимодействия.

### ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ МЕРЫ МНОЖЕСТВА ДЛЯ УЧЕТА СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ ОЦЕНКЕ ЦЕННОСТИ КРИТЕРИЕВ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Как было отмечено ранее, для учета системного взаимодействия критериев в задачах многокритериальной оптимизации, в частности, развита теория НМ ценности подмножеств множества критериев  $\Xi = \{\varphi_i\}$  рассматриваемой задачи. Эта теория обобщает метод скаляризации, т. е. перехода от многокритериальной задачи (далее операции) к однокритериальной с помощью линейной свертки

$$U(x) = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \varphi_i(x), \quad (1)$$

где  $U$  – единственный критерий,  $\{\varphi_i(x)\}$  – набор значений критериев на оцениваемом объекте  $x$ ,  $\rho_i$  – набор весовых коэффициентов, характеризующих ценность соответствующих критериев.

При применении формулы (1) предполагается нормализация критериев и выполнение условий

$$\rho_i \geq 0; \quad \sum_{i=1}^n \rho_i = 1.$$

Отличие метода Сугено от этого метода состоит в возможности учета не только значений критериев, но и их сочетаний. Вместо коэффициентов  $\rho_i$  задается функция множества, которая каждому подмножеству  $\Phi$  всего множества критериев  $\Xi$  задает ценность  $g(\Phi)$  всей совокупности критериев  $\Phi$ . Число  $g(\Phi)$  называется мерой ценности подмножества критериев  $\Phi$ .

Взаимодействие критериев проявляется в том, что величина  $g(\Phi)$  может быть больше (или меньше), чем сумма собственных ценностей всех критериев подмножества  $\Phi$ , т.е. суммы мер ценностей одноименных подмножеств  $\{\varphi_j\}, \varphi_j \in \Phi$

$$g(\Phi) > \sum_{\varphi_j \in \Phi} g(\{\varphi_j\}). \quad (2)$$

Таким образом, функция  $g(\Phi)$  неаддитивной меры.

В качестве НМ на практике целесообразно использовать  $\lambda$ -нечеткую меру Сугено  $g_\lambda(\cdot)$ , определяемую следующим  $\lambda$ -правилом: для любой пары непересекающихся подмножеств  $E, F$  множества  $\Xi$  мера их объединения равна

$$g_\lambda(E \cup F) = g_\lambda(E) + g_\lambda(F) + \lambda \cdot g_\lambda(E) \cdot g_\lambda(F); \quad -1 < \lambda < \infty. \quad (3)$$

В настоящей работе в качестве множества  $\Xi$  рассматривается множество критериев некоторой задачи выбора. Знак  $\lambda$  определяет характер меры. В частности, при  $\lambda > 0$  мера совокупности критериев больше суммы собственных мер ценностей этих критериев.

В практических задачах не все критерии в одинаковой степени взаимодействуют друг с другом. Это связано с тем, что множество критериев естественно возникает из результатов анализа цели операции [4, 5]. Как правило, цель операции  $A$  декомпозируется на ряд подцелей, что позволяет представить ее в следующем виде:

$$A = \{a^1, a^2, \dots, a^m\},$$

где  $a^i, i = 1, \dots, m$  – подцели,  $m$  – число подцелей.

Каждая подцель  $a^j$  индуцирует собственную систему критериев  $\Xi^j$ , оценивающих степень ее достижения для каждой альтернативы выбора. Таким образом, множество критериев операции  $\Xi$  оказывается объединением множеств  $\Xi^j$

$$\Xi = \bigcup_j \Xi^j.$$

Поскольку критерии из  $\Xi^j$  служат для оценки степени достижения общей подцели  $a^j$ , то с одной стороны естественно ожидать их взаимодействия, с другой стороны можно в первом приближении предположить отсутствие взаимодействия с критериями других подмножеств  $\Xi^m$ . В связи с этим для отображения взаимодействия критериев следует вводить индивидуальную НМ ценностей критериев  $g_\lambda^j(\cdot)$  для каждого  $\Xi^j$ . Общая НМ  $g_\lambda(\cdot)$  строится как аддитивное объединение частных мер  $g_\lambda^j(\cdot)$ .

В работах [3, 6] предложены экспертные методики построения НМ ценности критериев. В соответствии с этими методиками необходимо задать аддитивные меры ценности подмножеств  $\Xi^j, j = \overline{1, m}$ , а затем определить параметры НМ  $g_\lambda^j(\cdot)$  на каждом из этих множеств.

По свойству НМ [1] совокупная ценность всех критериев  $\Xi$  должна быть равна 1. Тогда, поскольку критерии из разных подмножеств  $\Xi^j$  по сделанному предположению не взаимодействуют, для суммы их относительных ценностей  $G^j$  действует аддитивный закон

$$\sum_{j=1}^m G^j = 1. \quad (4)$$

Значения  $G^j$  определяются экспертно в соответствии с важностью подцелей для достижения основной цели. Для них по определению имеет место формула

$$G^j = g_{\lambda}^j(\Xi^j). \quad (5)$$

Пусть класс взаимодействующих критериев  $\Xi^j$  содержит  $m^j$  критериев  $\varphi_i^j, i = \overline{1, m^j}$ . Все критерии считаем максимизируемыми и нормализованными, то есть для любой альтернативы  $x$   $0 \leq \varphi_i^j(x) \leq 1$ .

В соответствии с формулой (2) при наличии взаимодействия

$$G^j < \sum_i^{m^j} g_{\lambda}^j,$$

где  $g_{\lambda}^j = g_{\lambda}^j(\{\varphi_i^j\})$ , т.е. есть мера ценности одноименных множеств  $\{\varphi_i^j\}$ .

Очевидно, что  $\lambda$ -меры различных классов  $\Xi^j$  отличаются параметром  $\lambda$ . Обозначим этот параметр для класса  $\Xi^j$  через  $\lambda^j$ . Для его задания вводится коэффициент аддитивности

$$v^j = \frac{1}{G^j} \sum_{i=1}^{m_j} g_i^j, \quad (6)$$

который в этом случае меньше 1. Он характеризует степень уменьшения суммы собственных ценностей всех критериев подмножества  $\Xi^j$  по отношению к их совокупной ценности. Этот коэффициент задается экспертно, исходя из представления о степени взаимодействия критериев: меньшему значению  $v^j$  соответствует более интенсивное взаимодействие.

Задание НМ  $g_{\lambda}^j(\cdot)$  для каждого класса сводится к определению ее параметров: ценностей отдельных критериев  $g_i^j = g^j(\{\varphi_i^j\})$  этого класса, и параметра  $\lambda^j$ , позволяющего определить меру ценности любого подмножества критериев этого класса. Алгоритм определения параметров меры содержит следующие этапы [3].

1. По одной из известных методик (например, из [7]) определяются аддитивные относительные ценности критериев  $\rho_i^j$  внутри  $\Xi^j$  так, что

$$\rho_1^j + \rho_2^j + \dots + \rho_{m_j}^j = 1; \quad \rho_i^j > 0.$$

На этом этапе выбирается также коэффициент аддитивности  $v^j$ . Значение  $v^j$  рекомендуется выбирать в зависимости от разброса в значениях  $\rho_i^j$ . Максимальное взаимодействие наблюдается, как правило, при близких относительных важностях критериев. При этом коэффициент рекомендуется выбирать равным 0.5. При увеличении разбросанности значений  $\rho_i^j$  взаимодействие критериев снижается, поэтому величину  $v^j$  следует выбирать большей.

2. Рассчитывается ценность одноэлементных подмножеств множества  $\Xi^j$  по формуле

$$g_i^j = \rho_i^j \cdot v^j \cdot G^j. \quad (7)$$

3. Находится минимальный положительный корень  $x_0$  уравнения

$$\frac{x}{v^j} = \prod_{i=1}^{m^j} (1 + x \rho_i^j) - 1. \quad (8)$$

4. Рассчитывается параметр НМ по формуле

$$\lambda^j = x_0 / G^j v^j. \quad (9)$$

Уравнение (8) является алгебраическим уравнением степени  $m^j - 1$ , где  $m^j$  есть число критериев в классе  $\Xi^j$ .

После построения НМ  $g_\lambda^j(\cdot)$  для каждого подмножества  $\Xi^j$  мера ценностей критериев  $g(\cdot)$  на всем множестве  $\Xi$  строится по формуле

$$g(Y) = \sum_{j=1}^m \frac{1}{\lambda_j} \left( \prod_{i \in I_j} (1 + \lambda^j g_i^j) - 1 \right), \quad (10)$$

где  $Y$  – произвольное множество критериев из  $\Xi$ ,  $I_j$  – множество номеров критериев из  $\Xi^j$ , входящих в  $Y$ ,  $m$  – число классов критериев в  $\Xi$ .

### ЭКСПЕРТНАЯ МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ МЕРЫ ЦЕННОСТИ КЛАССОВ КРИТЕРИЕВ ПРИ НАЛИЧИИ СИСТЕМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ КРИТЕРИЯМИ РАЗНЫХ КЛАССОВ

Рассмотренная методика и, в частности, формула (10) представлена подробно в работах [5-7] в предположении об определенных классах критериев  $\Xi^j$ , соответствующих установленным подцелям операции, и отсутствии системного взаимодействия между критериями разных классов. На практике может отсутствовать декомпозиция цели операции на подцели при соответствующем априорном разбиении.

Представим процедуру требуемого разбиения множества  $\Xi$ .

Эксперту представляется всевозможные пары критериев множества  $\Xi$  с целью оценки степени их возможного системного взаимодействия при решении объявленной технологической задачи. Результаты оцениваются значениями, из отрезка  $[0, 1]$ , причем большей степени системного взаимодействия должно соответствовать большее значение. Тем самым строится нечеткое бинарное отношение.

Результаты попарного оценивания приводят к нечеткому бинарному отношению  $\tilde{\varepsilon}$ . Это отношение по определению является симметричным и рефлексивным. На практике отношение  $\tilde{\varepsilon}$  оказывается нетранзитивным, что препятствует его использованию для разбиения множества  $\Xi$  на непересекающиеся классы эквивалентности. Поэтому отношение  $\tilde{\varepsilon}$  подвергается транзитивному замыканию [9], которое в силу рефлексивности  $\tilde{\varepsilon}$  равно

$$\varepsilon = \tilde{\varepsilon}^{n-1}, \tag{11}$$

где  $n$  – число критериев во множестве  $\Xi$ .

Отношение  $\varepsilon$  порождает множество четких отношений эквивалентности  $\{\varepsilon_\alpha\}$ , где  $\varepsilon_\alpha$  –  $\alpha$ -уровень отношения  $\varepsilon$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , для которого

$$\varepsilon_\alpha(\varphi_i, \varphi_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \varepsilon(\varphi_i, \varphi_k) \geq \alpha, \\ 0, & \text{если } \varepsilon(\varphi_i, \varphi_k) < \alpha, \end{cases} \tag{12}$$

где  $(\varphi_i, \varphi_k)$  – пара критериев из  $\Xi$ .

Формула (12) означает, что системное взаимодействие между критериями каждого класса не слабее величины  $\alpha$ . Выбор  $\alpha$  определяется требованием к точности учета степени взаимодействия. Большим значениям  $\alpha$  соответствует более подробное разбиение с большим числом классов, наоборот, уменьшение  $\alpha$  приводит к более грубому разбиению и уменьшению числа классов.

Рассмотрим пример использования описанной экспертной процедуры [8]. В задаче рассматривается множество  $\Xi = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7\}$ . Результат работы экспертов позволил получить нечеткое бинарное отношение  $\tilde{\varepsilon}$ , матричное представление которого приведено в табл. 1. Строки и столбцы матрицы с номером  $i$ ,  $1 \leq i \leq 7$  соответствуют  $i$ -му критерию. Элемент  $\tilde{\varepsilon}_{ij}$  на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца, по мнению экспертов, отражает степень интенсивности системного взаимодействия соответствующей пары критериев.

Таблица 1  
Результат попарного оценивания степени взаимодействия критериев:  
нечеткое бинарное отношение  $\tilde{\varepsilon}$

	1	2	3	4	5	6	7
1		.7	.1	.2	.8	.7	
2	.7			.2	.7	.9	.1
3	.1				.2		.3
4	.2	.2			.1	.2	.8
5	.8	.7	.2	.1		.8	.1
6	.7	.9		.2	.8		
7		.1	.3	.8	.1		



Представление отношения  $\tilde{\varepsilon}$  в виде графа показано на рис. 1. На нем вершины графа соответствуют критериям, а веса дуг равны значениям  $\tilde{\varepsilon}_{ij}$ . Очевидно, что отношение  $\tilde{\varepsilon}$  не является транзитивным.

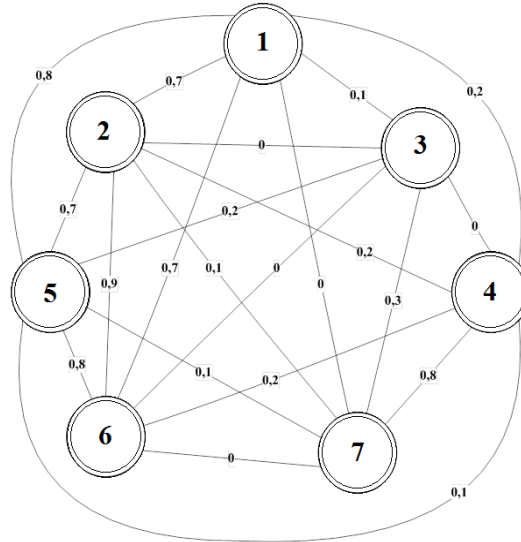


Рис. 1. Граф бинарного отношения  $\tilde{\varepsilon}$ , построенного на основании попарного оценивания степени взаимодействия критериев

Транзитивное замыкание  $\varepsilon$  отношения  $\tilde{\varepsilon}$ , граф которого показан на рис. 2, является рефлексивным, симметричным и транзитивным, т.е. является отношением эквивалентности.

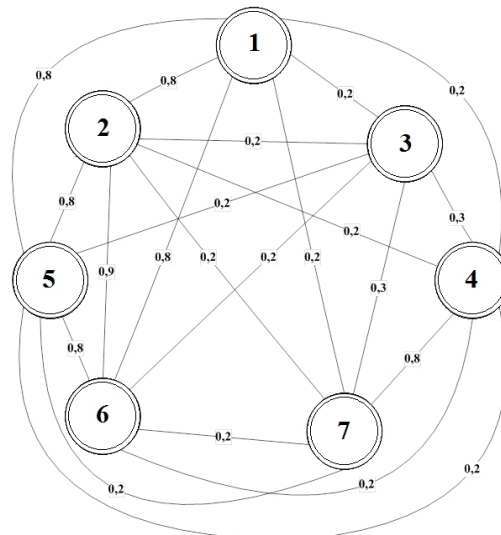


Рис. 2. Граф  $\varepsilon$ , полученный в результате транзитивного замыкания отношения  $\tilde{\varepsilon}$

Графы срезов  $\varepsilon_\alpha$  этого отношения показаны на рис. 3 и 4.

Этим графам соответствуют разбиения множества критериев  $\Xi$  на 2 и 3 класса эквивалентности соответственно.

Уровень  $\alpha = 0.8$  можно считать достаточно значимым, поэтому в соответствии с рис. 4. принимается разбиение множества  $\Xi$  на три класса  $\Xi_1 = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_5, \varphi_6\}$ ,  $\Xi_2 = \{\varphi_3\}$ ,  $\Xi_3 = \{\varphi_4, \varphi_7\}$ .

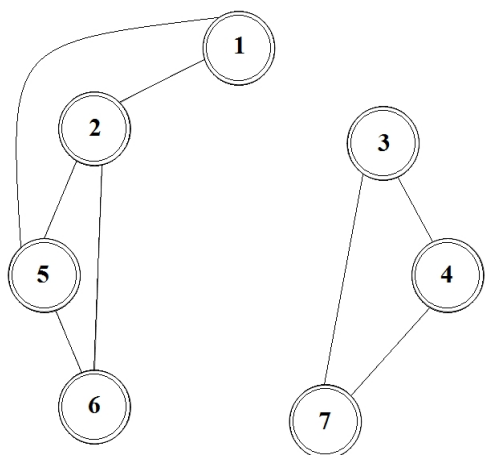


Рис. 3. Графы среза  $\varepsilon_{0.3}$

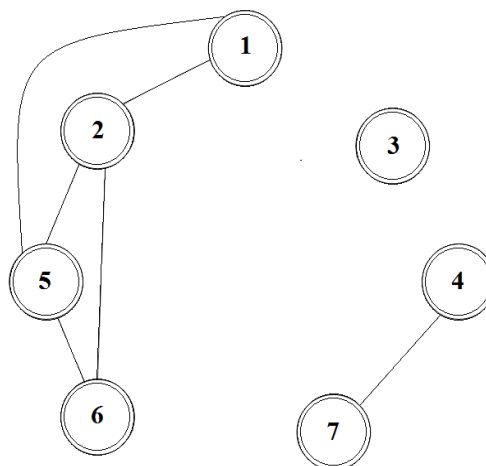


Рис. 4. Графы среза  $\varepsilon_{0.8}$

Таким образом, на основании парных сравнений множество критериев  $\Xi$  разбито на три класса критериев, причем системное взаимодействие внутри каждого из них не меньше 0.8.

С использованием приведенной методики строится НМ для каждого класса, параметры которой приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры нечеткой меры ценности критериев

Класс	$G_k$	Состав класса	$g_i$	$v_k$	$\lambda_k$
1	.451	$\varphi_1$	.12	.617	.37
		$\varphi_2$	.08		
		$\varphi_5$	.07		
		$\varphi_6$	.02		
2	.13	$\varphi_3$	.13		
3	.424	$\varphi_4$	.07	.60	3.26
		$\varphi_7$	.19		

Рассмотренная экспертная методика построения нечеткой меры выделения классов взаимно не взаимодействующих критериев (ВНЗК) может рассматриваться как альтернатива разбиения исходного множества критериев  $\Xi$  на классы, соответствующие априорно выделенным подцелям главной цели операции. При этом можно рассматривать обратную задачу, когда по результату ВНЗК необходимо определить подцели, возможно, соответствующим классам.

Помимо этого, задачу построения множества классов ВНЗК, далее обозначаемого как  $\hat{\Xi}$ , можно рассматривать в рамках теории многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования [8]. При этом каждый класс  $\Xi_i$  следует рассматривать как векторный критерий некоторой многовекторной задачи.

Наконец, можно поставить задачу выяснения наличия системного взаимодействия между векторными критериями. Эту задачу можно провести по вышеприведенной методике, проведя специальное экспертное исследование. Однако для ее решения можно использовать результаты экспертного исследования исходного множества критериев  $\Xi$ . Для этого откажемся от первоначального предположения об игнорировании взаимодействия между критериями разных классов.

Обратим внимание на то, что при выполнении операции среза отношения эквивалентности  $\varepsilon$  обнуляются некоторые элементы матрицы (или, что то же самое, обрываются ветви графа). Тем самым игнорируется некоторая информация, заложенная экспертами в исходное отношение.

На рис. 5 показан подграф, на котором выделены связи и их интенсивности графа  $\varepsilon$ , оборванные при построении среза  $\varepsilon_{0,8}$  для всех критериев класса  $\Xi_1$  с критерием  $\varphi_4$  и с критерием  $\varphi_7$  класса  $\Xi_3$ .

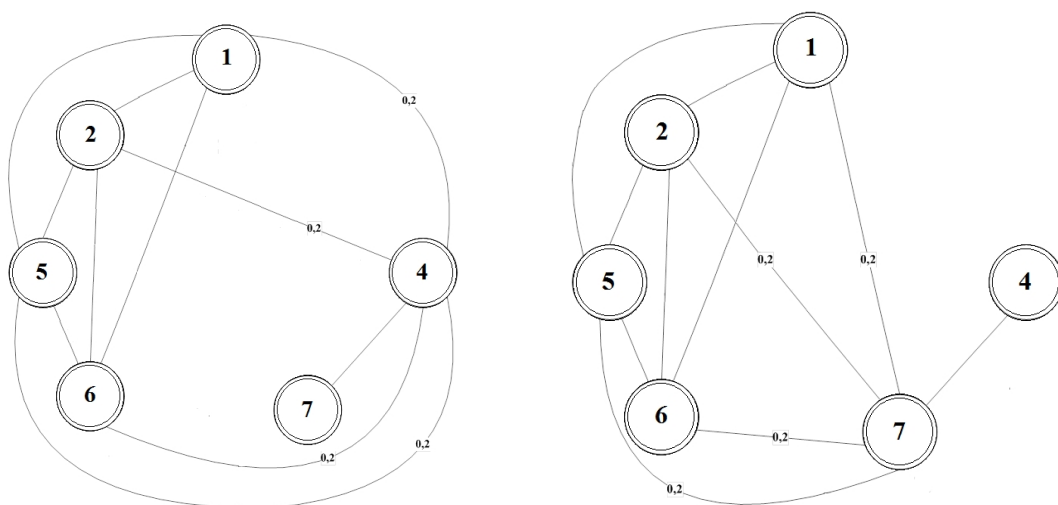


Рис. 5. Связи графа  $\varepsilon$ , оборванные при построении среза  $\varepsilon_{0,8}$  для всех критериев класса  $\Xi_1$  с критерием  $\varphi_4$  (слева) и с критерием  $\varphi_7$  (справа) класса  $\Xi_3$

На рис. 6 приведен подграф, на котором показаны связи и их интенсивности графа  $\varepsilon$ , оборванные при построении среза  $\varepsilon_{0,8}$  для всех критериев класса  $\Xi_1$  с критерием  $\varphi_3$  класса  $\Xi_2$  и для всех критериев класса  $\Xi_3$  с критерием  $\varphi_3$  класса  $\Xi_2$ .

Из рис. 5 и 6 следует, что информация, заложенная в оборванных при построении среза  $\varepsilon_{0,8}$  связях, свидетельствует о наличии слабого взаимодействия между элементами разных классов и, следовательно, между самими классами. На рис. 7 показана структура этих связей.

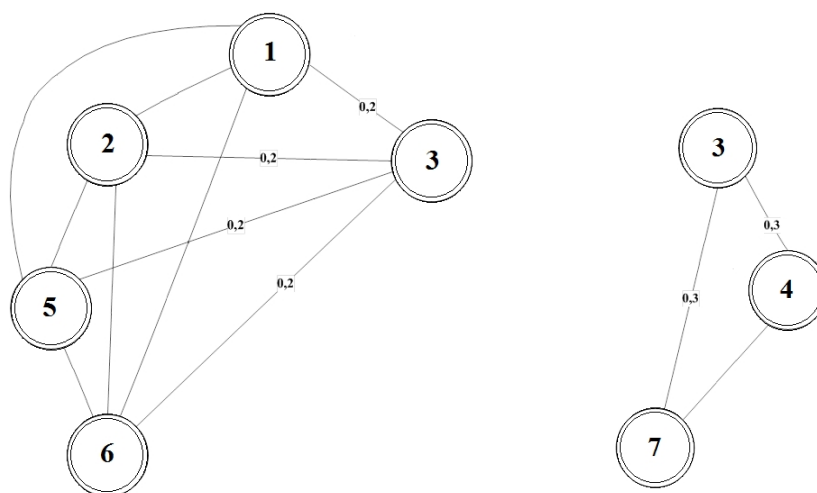


Рис. 6. Подграф оборванных при построении среза  $\varepsilon_{0,8}$  связей графа  $\varepsilon$  и их интенсивностей для всех критериев класса  $\Xi_1$  с критерием  $\varphi_3$  класса  $\Xi_2$  (слева) и для всех критериев класса  $\Xi_3$  с критерием  $\varphi_3$  класса  $\Xi_2$  (справа)

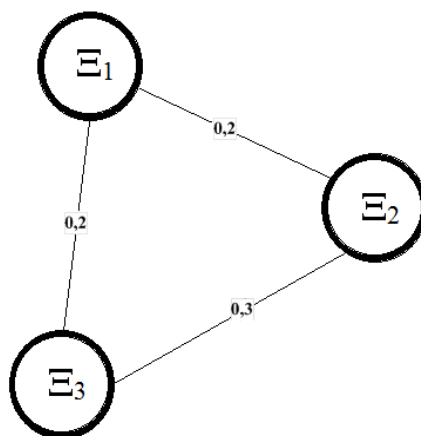


Рис. 7. Граф восстановленных связей между классами

Нетрудно видеть, что отношение  $\delta$  (табл. 3) является транзитивным и, следовательно, транзитивное замыкание не требуется. В данном случае целесообразно использовать срез  $\delta_{0,3}$  (табл. 4).

Таблица 3

Матрица соответствующего нечеткого отношения  $\delta$

	1	2	3
1		.2	.2
2	.2		.3
3	.2	.3	

Таблица 4

Матрица среза  $\delta_{0.3}$

	1	2	3
1			
2			.3
3		.3	

Таким образом, множество классов  $\hat{\Xi}$  разбивается на два класса второго порядка  $\hat{\Xi}_1 = \{\Xi_1\}$  и  $\hat{\Xi}_2 = \{\Xi_2, \Xi_3\}$ , относительные аддитивные ценности которых равны  $\hat{G}_1 = 0.451$  и  $\hat{G}_2 = 0.549$ . НМ ценности целесообразно строить только для  $\hat{\Xi}_2$ .

Вспользуемся методикой построения нечеткой меры, приведенной выше.

1. Аддитивные относительные ценности критериев  $\hat{\rho}_i$  внутри  $\hat{\Xi}_2$  равны

$$\hat{\rho}_2 = 0.23; \hat{\rho}_3 = 0.77.$$

Поскольку разброс этих значений значительный, величину коэффициента аддитивности  $\nu$  следует выбрать близкой к 1, положим ее равной 0.8.

2. Рассчитаем ценность одноэлементных подмножеств множества  $\hat{\Xi}_2$  по формуле (7)

$$\hat{g}_2 = \hat{\rho}_2 \cdot \nu \cdot \hat{G}_2 = 0.23 \cdot 0.8 \cdot 0.542 = 0.101;$$

$$\hat{g}_3 = \hat{\rho}_2 \cdot \nu \cdot \hat{G}_2 = 0.77 \cdot 0.8 \cdot 0.542 = 0.338.$$

3. Уравнение (8) в данном случае имеет вид

$$\frac{1}{\nu} = 1 + x \hat{\rho}_2 \hat{\rho}_3.$$

Таким образом,  $x = 1.41$ .

4. Рассчитаем параметр  $\hat{\lambda}$

$$\hat{\lambda} = x / \hat{G}_2 \nu = 1.41 / (0.549 \cdot 0.8) = 3.21.$$

Параметры построенной НМ сведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры нечеткой меры классов  $\hat{\Xi}$

Класс	$G_k$	$\hat{\rho}_i$	Состав класса	$\hat{g}_1$	$\nu_k$	$\lambda$
	.451		$\Xi_1$			
	.549	.23	$\Xi_2$	.101	.8	.21
		.77	$\Xi_3$	.338		

### РАСЧЕТ МЕРЫ ПРОИЗВОЛЬНОГО МНОЖЕСТВА КРИТЕРИЕВ

Представленные методики находят применение при решении многокритериальных задач оптимизации в условиях наличия системного взаимодействия критериев. В работе [10] дано описание и сравнение нескольких алгоритмов расчета скалярных показателей, используемых в таких задачах. Эти алгоритмы опираются на расчет нечеткой меры ценности критериев. В указанной работе принято предположение о независимости критериев различных классов из  $\hat{\Xi}$ . Поэтому расчет меры ценности произвольного множества критериев производится по формуле (10). В связи с учетом взаимодействия между классами критериев, приведенного в настоящей работе, необходимо модернизировать эту формулу.

Рассмотрим величину

$$\Gamma_j(Y) = \frac{1}{\lambda_j} \left( \prod_{i \in I_j(Y)} (1 + \lambda_j g_i^j) - 1 \right), \quad (13)$$

стоящую под знаком суммы в формуле (10). Она представляет собой результирующую меру ценности критериев множества  $Y$ , попадающих в класс  $\Xi_j$ . Напомним, что  $I_j(Y)$  есть множество индексов таких критериев.

С учетом обозначения (13) естественным требуемым обобщением формулы (10) для расчета меры ценности произвольного множества критериев является формула

$$\Gamma(Y) = \sum_{s=1}^r \frac{1}{\Lambda_s} \left( \prod_{j \in L_s(Y)} (1 + \Lambda_s \Gamma_j(Y)) - 1 \right). \quad (14)$$

Здесь  $\Lambda_s$  –  $\lambda$ -параметр нечеткой меры ценности вторичного класса  $\hat{\Xi}_s$ ,  $L_s(Y)$  – множество индексов классов из  $\hat{\Xi}$ , содержащих критерии из  $Y$  и входящие во вторичный класс  $\hat{\Xi}_s$ ,  $r$  – число вторичных классов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены процедуры для экспертного исследования многокритериальных задач выбора и оптимизации с целью установления эффекта системного взаимодействия между критериями. Предложен подход к распространению нечеткой меры ценности критериев, моделирующий этот эффект, на классы взаимодействующих критериев. Рассматриваемая в работе процедура разбиения множества критериев на классы системно взаимодействующих критериев может интерпретироваться в рамках теории многовекторной оптимизации и использоваться при построении многовекторных критериев.

Материал статьи может быть использован при решении многокритериальных и многовекторных задач анализа сложных систем.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sugeno M. Fuzzy decision-making problems // Trans. SICE. 1975. V. 11, No. 6. P. 85-92.
2. Sugeno M., Terano T. A model of learning based on fuzzy information // Kybernetes. 1977. V. 6. P. 157-166.
3. Sugeno M. Fuzzy measure and fuzzy integral // Trans. SICE. 1972. V. 8. P. 95-102.
4. Sugeno M. Analytic representation of fuzzy systems // Fuzzy Automata and Decision Processes. Amsterdam: North-Holland. 1977. P. 177-189.
5. Использование нечеткой меры ценности критериев при многокритериальном выборе / Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский, А.В. Денисов, А.А. Дмитриев // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 9. С. 38-42.

6. Разбиение множества критериев на непересекающиеся классы системно связанных критериев / А.В. Денисов, Н.П. Митяшин, Е.Е. Миргородская, А.А. Дмитриев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. тр. XXVIII Международ. науч. конф.: в 12 т. Т. 4. / под общ. ред. А.А. Большакова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2015; Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т; Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2015. С. 72-74.

7. Денисов А.В. Развитие методов многокритериальной оптимизации оборудования модульной структуры в условиях системного взаимодействия критериев: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Саратов, 2013. 155 с.

8. Сафронов В. В. Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования: монография. Саратов: Научная книга, 2009. 329 с.

9. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 321 с.

10. Сравнение показателей скаляризации задач выбора при взаимодействии критериев / А.В. Денисов, Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, Д.А. Васильев // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2018): сб. тр. VI Международ. науч. конф., Саратов: СГТУ, 2018. С. 322-326.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Миргородская Екатерина Евгеньевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

**Митяшин Никита Петрович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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



**Томашевский Юрий Болеславович** –  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Системотехника и управление  
в технических системах» Саратовского  
государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.

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

**Трегубова Елизавета Владимировна** –  
аспирант кафедры «Системотехника  
и управление в технических системах»  
Саратовского государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.

**Elizaveta V. Tregubova** –  
Postgraduate student,  
Department of System Engineering and Con-  
trol in Technical Systems, Yuri Gagarin State  
Technical University of Saratov

**Аль-Карави Раад Джоудех** –  
аспирант кафедры «Системотехника  
и управление в технических системах»  
Саратовского государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.

**Al-Qarawi Raad Joudah** –  
Postgraduate student, Department  
of System Engineering and Control in Tech-  
nical Systems, Yuri Gagarin State  
Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 01.06.2022, принята к опубликованию 12.09.2022*

УДК 681.2

**О.В. Захаров, А.С. Яковишин, А.В. Жуков**

**ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ СЕРИИ ISO 16610  
ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ.  
ЧАСТЬ 2. ПРОФИЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ ГАУССА**

*Аннотация.* Вашему вниманию предлагается вторая статья из цикла, посвященного применению серии стандартов ISO 16610 для фильтрации профиля и структуры поверхности. В настоящей статье представлен анализ двух стандартных профильных фильтров Гаусса: линейного и робастного регрессионного. Фильтры Гаусса – самые распространенная и изученная группа фильтров. Традиционно результаты, полученные новыми фильтрами, сравнивают с линейным фильтром Гаусса. Описана история создания регрессионного фильтра, особенности его использования для multifunctionальных поверхностей. Рассмотрены ограничения фильтров, связанные с краевыми эффектами, и методы их минимизации. Показано применение линейного фильтра Гаусса для замкнутых профилей при анализе круглости. В заключении отмечена эффективная область применения профильных фильтров Гаусса.

*Ключевые слова:* измерение, метрология поверхности, шероховатость, фильтрация, профильный фильтр, фильтр Гаусса, робастный фильтр

**O.V. Zakharov, A.S. Yakovishin, A.V. Zhukov**

**APPLICATION OF FILTERS OF ISO 16610-SERIES  
FOR SURFACE TEXTURE ANALYSIS.  
PART 2. GAUSS PROFILE FILTERS**

*Abstract.* The authors present a second article in the series devoted to application of filters of ISO 16610 standard series used in filtering the profile and surface texture. This article presents an analysis of two standard Gaussian profile filters: linear and robust regression filters. Gaussian filters are the most commonly used and most extensively studied group of filters.

Traditionally, the results obtained for the new filters are compared with linear Gaussian filters. The history of creating regression filters, their use for multifunctional surfaces is described. Disadvantages of the filters associated with end effects and methods for minimizing them are considered. Application of the linear Gaussian filter for closed profiles in the analysis of roundness is presented. The focus is made on an effective application area of the Gaussian profile filters.

**Keywords:** measurement, surface metrology, roughness, filtration, profile filter, Gaussian filter, robust filter

## ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАУССА

Основные определения и понятия, связанные с фильтрацией, даны в стандарте ГОСТ Р 8.895-2015 (соответствует ISO 16610-1:2015) и были приведены нами в [1]. Измеренный профиль состоит из трех компонентов: формы, волнистости и шероховатость, как показано на рис. 1 [2].

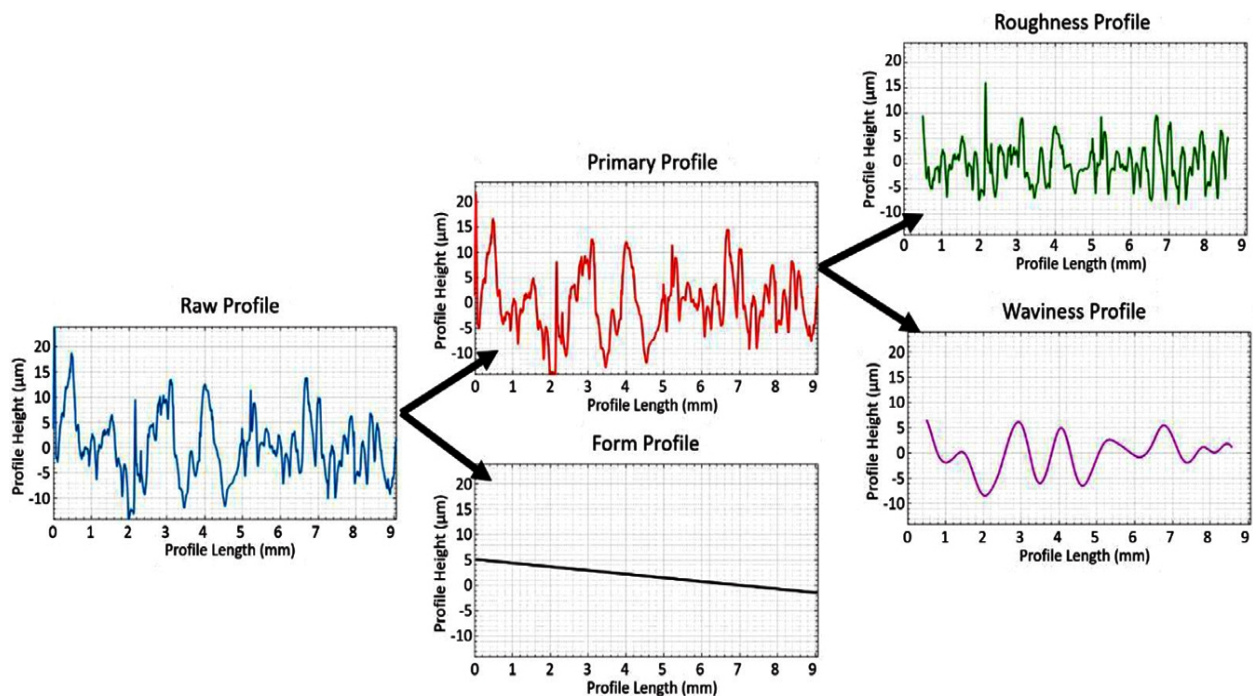


Рис. 1. Разделение компонент измеренного профиля [2]

Разложение на отдельные компоненты выполняют согласно ISO 4287:1997 на основе фильтрации Гаусса. Фильтрация использует три длины волны отсечки  $\lambda_s$ ,  $\lambda_c$  и  $\lambda_f$ , согласно ISO 16610-21:2015, разделяя профиль с помощью длин волн. Фильтр профиля  $\lambda_s$  разделяет шаговые параметры шероховатости с параметрами коротковолновых неровностей (микрошероховатость). Фильтр  $\lambda_c$  разделяет шаговые параметры шероховатости волнистости с перекрытием 50 %. В более ранних стандартах ISO была принята величина

## Машиностроение

перекрытия 75 %, являвшееся компромиссом между требованиями стандартов Великобритании и США [3]. Фильтр  $\lambda f$  разделяет шаговые параметры волнистости с параметрами длинноволновых отклонений формы поверхности. Исходя из этого, получают: первичный профиль, который не подвергается фильтрации, за исключением фильтрации механическим щупом; профиль шероховатости, который получают из первичного с помощью фильтра  $\lambda c$ ; профиль волнистости, который получают из первичного с помощью последовательного применения фильтров  $\lambda c$  и  $\lambda f$ .

В 1960-е годы с широким внедрением микроэлектроники активно развивались и получили распространение аналоговые фильтры. В первом издании ISO 3274:1975 был предложен фильтр «2RC», использовавшийся до 1990-х годов. Однако этому фильтру была свойственна нелинейность, которая серьезно искажала форму профиля. Фильтр «2RC» работает не в пространственной, а во временной области, поэтому его весовая функция асимметрична. Д. Уайтхаус заметил недостатки фильтра 2RC и предложил метод фильтрации с фазовой коррекцией [3]. Уже в 1970-х годах быстрое развитие компьютеров позволило использовать методы цифрового анализа, которые можно было применять для измерения структуры поверхности. Например, использовали алгоритм регрессии для цифровой обработки фильтра 2RC, что позволило повысить скорость фильтрации профилей [4]. В 1990-х годах классические фильтры Гаусса заменили фильтр 2RC в качестве стандартизированного фильтра (ISO 11562:1996). Однако у фильтра Гаусса также есть недостатки, такие как краевой эффект. Поэтому в дальнейшем появился двухступенчатый фильтр Гаусса (ISO 13565-1:1996).

Двухступенчатый фильтр Гаусса является результатом эмпирического подхода [5]. На первом этапе используется стандартный фильтр Гаусса для получения эталонной линии профиля. Затем из состава профиля исключаются все грубые выбросы от эталонной линии. Для этого используются различные критерии обработки результатов измерения. Далее формируется модифицированный профиль, в котором все отброшенные участки заменяются участками эталонной линии. Окончательно модифицированный профиль повторно обрабатывается линейным фильтром Гаусса. Метод является достаточно эффективным и применяется для стратифицированных поверхностей по ISO 13565-1:1996. Вместе с тем выбор критерия удаления выбросов определяется исследователем. При этом сокращается объем данных профиля на 20-60 % [6]. Пример использования двухступенчатого фильтра Гаусса приведен на рис. 2.

Также был разработан регрессионный фильтр Гаусса (ISO 11562:1996) для сглаживания зашумленных широкополосных данных, при котором лучше сохраняются высокочастотные составляющие сигнала [5]. В результате выступы остаются практически без изменения. Весовая функция регрессионного фильтра второго порядка лишь немного отличается от весовой функции стандартного фильтра Гаусса [7].

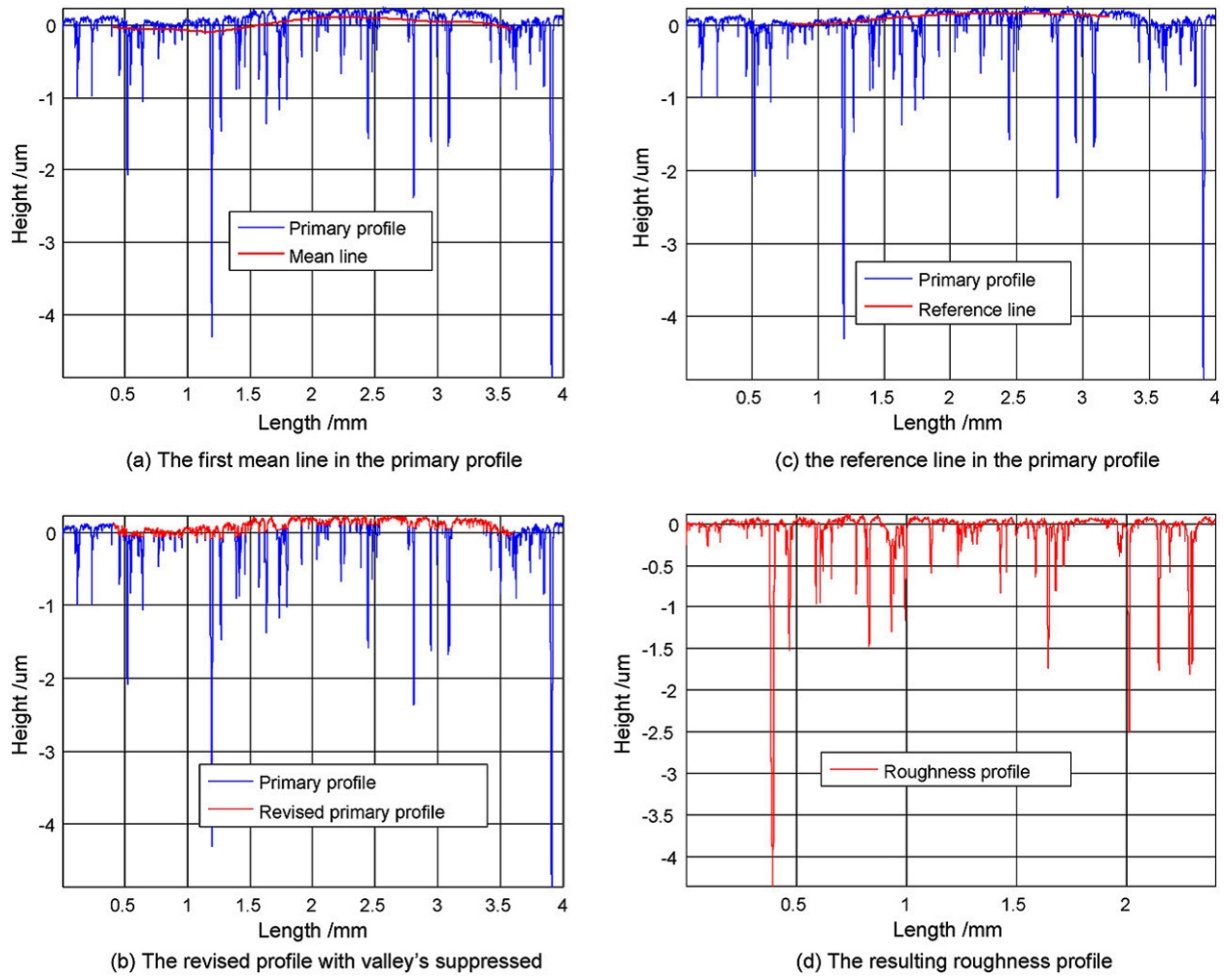


Рис. 2. Профиль шероховатости с использованием двухступенчатого фильтра Гаусса: а – первая средняя линия профиля, б – профиль с подавлением впадин, с – эталонная линия профиля, d – фильтрованный профиль [6]

Для сравнения на рис. 3 показаны весовые функции и передаточные характеристики стандартного и регрессионного фильтров Гаусса. Далее этот фильтр был заменен на линейный фильтр Гаусса (ISO 16610-21:2011).

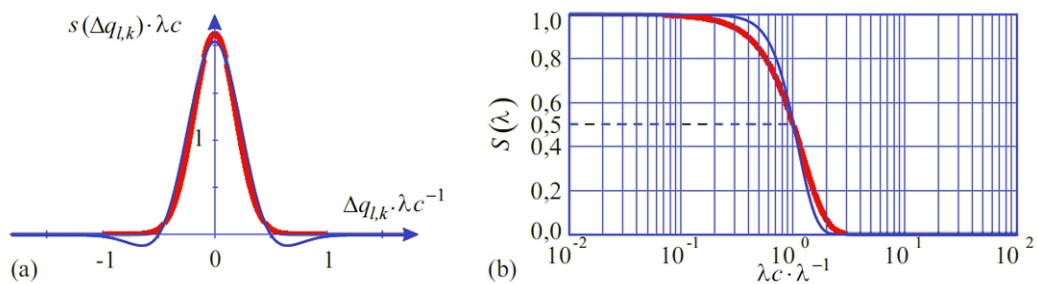


Рис. 3. Весовая функция (а) и передаточная характеристика (б) регрессионного фильтра Гаусса 2-го порядка [7]

В настоящее время применяют следующие стандартные профильные фильтры: линейный фильтр Гаусса (ГОСТ Р ИСО 16610-21:2015) и робастный регрессионный фильтр Гаусса (ISO 16610-31:2016).

### ЛИНЕЙНЫЙ ПРОФИЛЬНЫЙ ФИЛЬТР ГАУССА

Профильные фильтры Гаусса – наиболее используемые профильные фильтры. Функция Гаусса является идеальным фильтром, который может удовлетворять минимальному произведению ширины времени и ширины частоты, определяемому плотностью момента энергии [3]. Математическая основа профильного фильтра Гаусса изложена в [8]. Отечественные исследования по этому направлению отражены в [9-11].

Теоретическая весовая функция для открытого фильтра Гаусса определяется по формуле:

$$S(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_C} \exp \left[ -\pi \left( \frac{x}{\alpha \lambda_C} \right)^2 \right], \quad -L_C \lambda_C \leq x \leq L_C \lambda_C,$$

где  $x$  – расстояние от центра весовой функции,  $\lambda_C$  – длина волны среза,  $L_C$  – константа среза весовой функции,  $\alpha = \sqrt{\ln 2 / \pi} \approx 0,4697$  – константа для обеспечения 50 % пропускания амплитуды на длине волны среза.

Передаточная характеристика длинноволновой (низкочастотной) компоненты открытого профиля определяют при помощи преобразования Фурье весовой функции:

$$\frac{a_1}{a_0} = \exp \left[ -\pi \left( \frac{\alpha \lambda_C}{\lambda} \right)^2 \right],$$

где  $a_0, a_1$  – амплитуда синусоидального профиля до фильтрации и по средней линии соответственно,  $\lambda$  – период синусоидального профиля.

Ограниченная весовая функция является аппроксимацией неограниченной весовой функции Гаусса (рис. 4). Поэтому при свертке ограниченной функции будет присутствовать ошибка по сравнению с неограниченной функцией. Ошибка не должна превышать приемлемого уровня для константы среза  $L_C$ . Для  $L_C = 0,5$  ошибка составляет 0,76 %.

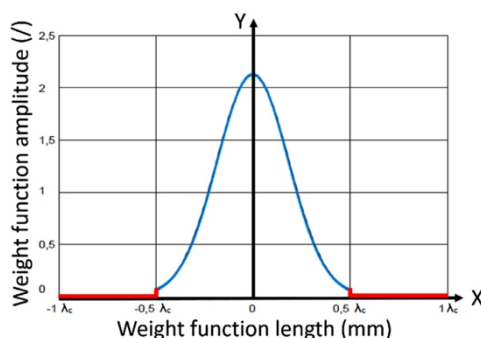


Рис. 4. Ограниченная весовая функция Гаусса [12]

## КРАЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ ФИЛЬТРАЦИИ

Когда фильтры Гаусса используются для фильтрации открытых профилей, возникает так называемый краевой эффект [1]. Эффективная часть весовой функции на обоих концах будет превышать край профиля. Поэтому свертка весовой функции и данные конца профиля будут неожиданно изменяться, то есть данные на обоих концах профиля после фильтрации искажаются.

Стандартная фильтрация Гаусса работает путем свертки заранее определенного ядра и весовой функции с первичным профилем. Это ядро имеет бесконечную длину, но довольно быстро приближается к нулю при удалении от центра. Для такой функции ядра требуется входные данные бесконечной длины по обе стороны от центра весовой функции, где вычисляется выходное значение.

Как показано на рис. 4, это ядро обычно усекается с обеих сторон, поэтому его можно использовать в свертке с конечными длинами данных. Стандарт ISO 16610-21:2011 предлагает, чтобы это усеечение с обеих сторон было равно  $\lambda_s$ , вместо изображенного  $\lambda_s/2$  на рис. 4, для минимальных ошибок в конечном результате. Усекая эту весовую функцию до определенной ширины, ее можно использовать для свертки с входными данными конечной длины, при условии, что она достаточно длинная (т. е. не менее  $2\lambda_s$ ).

Таким образом, результирующий профиль после фильтрации имеет меньшую длину, чем первичный профиль. Выходной сигнал можно рассчитать, только начиная с расстояния, равного ширине усеечения  $t$  от краев профиля, показанных красным цветом на рис. 5.

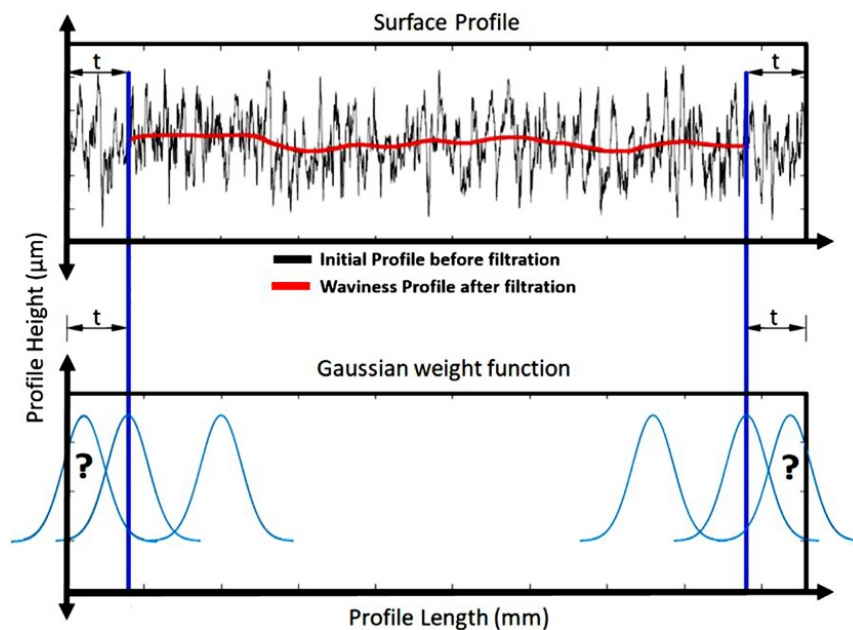


Рис. 5. Ограниченная весовая функция Гаусса (ISO 16610-28:2016)

Важно отметить, что все данные действительно используются для расчета выходных значений, но выходная длина короче, поэтому параметры профиля рассчитываются для более короткой длины. Это называется «краевыми эффектами» (ISO 16610-28:2016).

Краевой эффект исследовался во многих публикациях [6-8, 13, 14]. Результатом стал вывод о том, что наиболее эффективный способ устранения краевого эффекта – расширение концов профиля. В ISO 16610-28 предложены три общих метода расширения профиля, а именно: метод заполнения нулями, метод линейной экстраполяции и метод симметричного расширения. Метод заполнения нулями – самый простой способ сохранить длину обхода после фильтрации профиля. Однако этот метод подходит только для профилей без уклонов.

Метод линейной экстраполяции использует метод наименьших квадратов для подбора профиля области краевого эффекта и получения подогнанного линейного сегмента в виде расширенной области. Этот метод подходит для профилей без уклона, а также с заранее определенным углом наклона. Метод симметричного расширения состоит из симметричного расширения двух конечных точек области краевого эффекта и включает осевую симметрию и точечную симметрию.

Расширенный профиль имеет направление наклона, которое значительно отличается от исходного направления наклона, и этот подход не может справиться со сложными ситуациями фильтрации. Эти три метода также имеют тот недостаток, что они плохо адаптируются к заданному профилю, и выбор подходящего метода для различных профилей в реальных проектах затруднен.

Также ISO 16610-28 предлагает критерий удержания момента. Этот метод подходит для всех профилей. При этом изменяется весовая функция Гаусса в соответствии с положением в области краевого эффекта и гарантируется, что общий вес весовой функции равен 1. Таким образом, фильтр регрессии Гаусса устраняет краевой эффект путем изменения весовой функции. На рис. 6а показана весовая функция регрессионного фильтра Гаусса нулевого порядка в десяти различных положениях профиля. Чтобы четко показать изменение формы вблизи границы, на рис. 6а показаны только первые 2 мм весовой функции. Когда первый момент равен 0, то можно добиться надежного эффекта фильтрации и избежать проблемы искажения, вызванной расширением профиля. Для проверки граничных характеристик фильтра регрессии Гаусса в MATLAB сгенерирован нормально распределенный случайный шум (рис. 6б). Обнаружено, что фильтр Гаусса имеет очевидный краевой эффект на границе, в то время как регрессионный фильтр Гаусса нулевого порядка лучше охватывает профиль. Таким образом, фильтр регрессии Гаусса полезен, когда нельзя допустить краевого эффекта, например при измерении короткой трассы профиля.



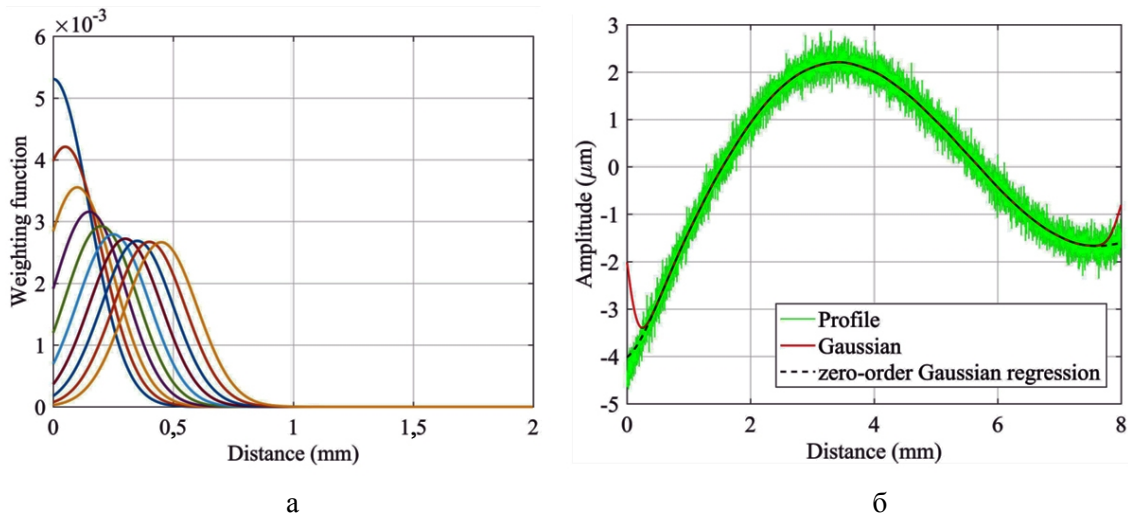


Рис. 6. Модифицированная весовая функция Гаусса (а) и профиль шероховатости (б) [13]

### ЛИНЕЙНЫЙ ФИЛЬТР ГАУССА ДЛЯ ЗАМКНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Для анализа замкнутых профилей также используют линейный фильтр Гаусса. Не рекомендуется применять фильтр Гаусса для дуг окружностей с длиной, меньшей  $2\lambda_c$ .

Традиционно физический смысл спектра Фурье описывается следующим образом [3]: 0-я гармоника есть средний радиус, 1-я гармоника представляет собой эксцентриситет, 2-я гармоника – овальность, с 3-й по 20-ю гармоники относят к погрешностям формы (К), с 20-й по 100-ю – к волнистости (В), с 100-й по 1000-ю – к дефектам поверхности (Ш). Гармоники с 3-й по 5-ю отражают погрешности траектории инструмента относительно заготовки и связаны с закреплением последней. Гармоники с 6-й по 20-ю вызваны вибрацией из-за недостаточной жесткости технологической системы. Гармоники с 20-й по 100-ю отражают особенности процесса резания и наростообразования. Применение фильтра Гаусса для анализа круглости иллюстрирует рис. 7.

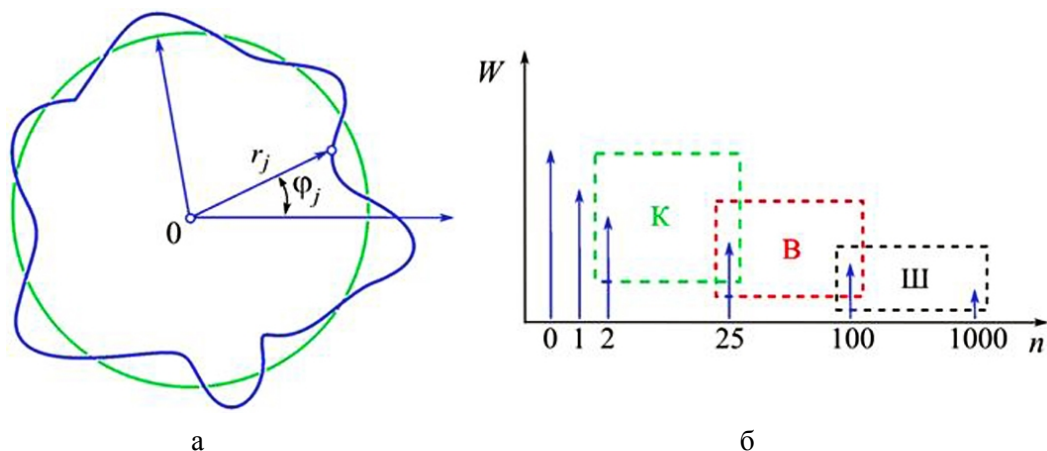


Рис. 7. Фильтрация при измерении круглости: а – замкнутый профиль; б – спектр Фурье

При измерении на кругломерах в спектре Фурье отсутствует 0-я гармоника, т. к. измеряется не собственно радиус, а приращение радиуса относительно заданного радиуса вращения датчика [15]. Первая гармоника часто используется для центрирования или программного исключения эксцентриситета. Однако подробные исследования показали, что такой подход дает достаточно грубый результат [16-18]. Поэтому появление 1-й гармоники в спектре сигнализирует о недостаточно точном центрировании. Кроме того, действительный эксцентриситет обуславливает появление не только 1-й гармоники, но и дает «размытие» 2-й и четных гармоник.

Теоретическая весовая функция для замкнутого фильтра Гаусса определяется как свертка гауссовой функции плотности по формуле

$$S(x) = \frac{f_C}{\alpha L} \exp\left[-\pi\left(\frac{xf_C}{\alpha L}\right)^2\right], \quad -\frac{L_C L}{f_C} \leq x \leq \frac{L_C L}{f_C},$$

где  $f_C$  – частота среза ( $L/\lambda_C$ ).

Передаточная характеристика для средней линии с учетом  $\lambda_C \ll L$  равна

$$\frac{a_1}{a_0} = \exp\left[-\pi\left(\frac{\alpha f_C}{f}\right)^2\right],$$

где  $f$  – частота синусоидального профиля (число периодов на оборот профиля).

Линейный фильтр Гаусса для замкнутого профиля реализован в программе MATLAB [19]. Имеются функции для фильтрации по замкнутому профилю, для расчета значения весовой функции Гаусса и свертки весовой функции. Передаточная характеристика приведена на рис. 8.

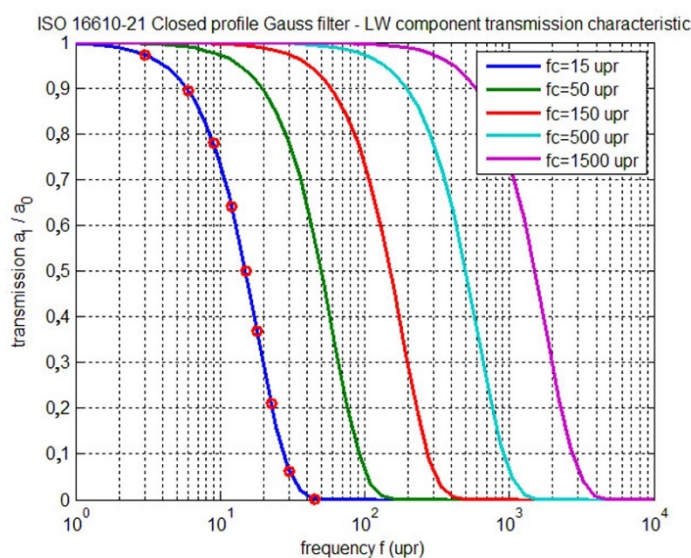


Рис. 8. Передаточная характеристика коротковолновой компоненты замкнутого профиля при разных числах периодов на оборот профиля

Математика для ограниченной весовой функции Гаусса в случае замкнутого профиля идентична случаю открытого профиля. Рекомендуется для общего использования применять константу среза  $L_C = 0,5$ . Иллюстрация применения фильтра для шлифованной поверхности кольца подшипника приведена на рис. 9. Показаны три варианта профиля с частотами среза  $f_C = 10, 20, 50$ .

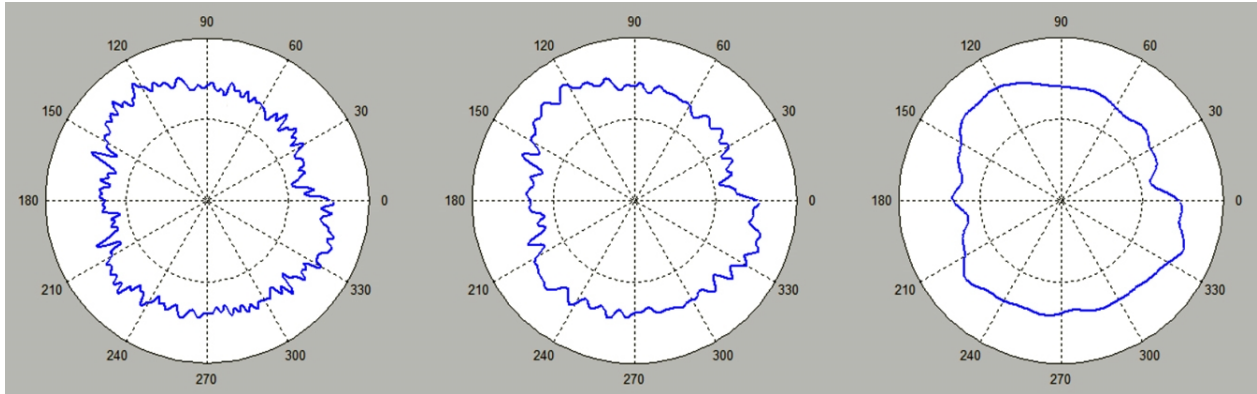


Рис. 9. Замкнутый профиль после фильтрации: а –  $f_C = \pi/50$ ; б –  $f_C = \pi/20$ ; в –  $f_C = \pi/10$

### РОБАСТНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ ПРОФИЛЬНЫЙ ФИЛЬТР ГАУССА

Робастный регрессионный фильтр Гаусса был обоснован в [7, 20]. Робастный регрессионный фильтр сочетает в себе функцию надежного веса с фильтром регрессии Гаусса для итерационного вычисления веса в каждой точке выборки. Таким образом, это фильтр регрессии, основанный на весовой функции Гаусса и надежной весовой функции.

Робастный регрессионный фильтр Гаусса описывается выражениями [13]:

$$w = (100) \left( X_k^T S_k X_k \right)^{-1} X_k^T S_k z,$$

$$X_k = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,k} & x_{1,k}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n,k} & x_{n,k}^2 \end{bmatrix}, \quad S_k = \begin{bmatrix} s_{1,k} \delta_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_{2,k} \delta_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & s_{n,k} \delta_n \end{bmatrix},$$

$$x_{l,k} = (l - k) \Delta x, \quad l = 1, \dots, n.$$

$$s_{l,k} = \frac{1}{\gamma \lambda_c} \exp \left( -\pi \left( \frac{x_{l,k}}{\gamma \lambda_c} \right)^2 \right), \quad k, l = 1, \dots, n.$$

где  $w$  – выходной вектор фильтрованного профиля размерности  $n$ ,  $z$  – входной вектор исходного профиля размерности  $n$ ,  $X_k$  – матричная форма функции регрессии,  $S_k$  – весовая функция,  $s_{l,k}$  – функция Гаусса,  $k$  – индекс ординат профиля,  $\gamma$  – константа ( $\gamma = 0,7309$ ),  $\delta$  – дополнительный вес,  $C$  – параметр масштаба.

Уравнение фильтра необходимо решать итерационно и методом взвешенных наименьших квадратов. Поскольку для каждой итерации требуется не менее  $n^2$  операций, эффективность вычислений низкая. Вначале проводится фильтрация линейным фильтром Гаусса и определяется расхождение  $x_n$  между первичным профилем и результатом фильтрации. Рассчитываются модули расхождения  $r_n = |x_n|$ , медиана  $\text{median}(x)$ , пороговая константа  $C = 4,4478\text{median}(|x_n|)$  и поправочные коэффициенты на основе функции Тьюки [5]:

$$\delta_n = \begin{cases} \left(1 - (r_n / C)^2\right)^2 & \text{при } r_n \leq C, \\ 0 & \text{при } r_n > C. \end{cases}$$

В большинстве случаев поправочные коэффициенты близки к единице. При выбросах, где отклонение профиля превышает  $3\sigma$ , они обращаются в ноль. Затем профиль корректируется умножением на поправочные коэффициенты. В результате получается профиль, практически свободный от выбросов. Далее скорректированный профиль повторно обрабатывается линейным фильтром Гаусса. Уже после второй итерации результаты бывают приемлемыми.

Примеры с использованием робастного регрессионного фильтра Гаусса даны на рис. 10 для поверхности хонингованной гильзы цилиндра. Измеренные профили имеют значительную составляющую формы в виде наклона (рис. 10а) или дуги окружности (рис. 10с). После фильтрации эталонная линия соответствует компонентам формы в исходных данных измерений, а профиль шероховатости не искажается выбросами.

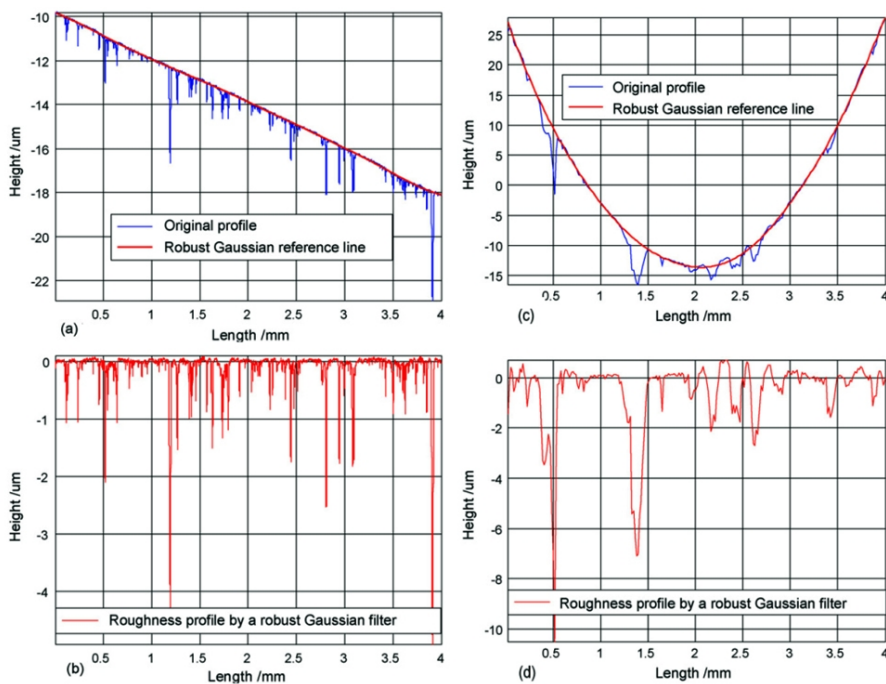


Рис. 10. Результат фильтрации регрессионным робастным фильтром Гаусса:  
а, с – эталонная линия, b, d – фильтрованный профиль [6]

На эффективность фильтрации влияет количество итераций. Чем больше итераций, тем сильнее подавление выбросов. Количество итераций зависит от порога фильтрации. В качестве примера на рис. 11 показан результат фильтрации поверхности после хонингования для 2 и 5 итераций соответственно. Можно обнаружить, что 2 итерации не могут хорошо сдерживать влияние больших глубоких впадин. Удовлетворительную эталонную линию можно было получить за 5 итераций. Следовательно, выбор порогового значения должен определяться повторными экспериментами в соответствии с морфологией поверхности.

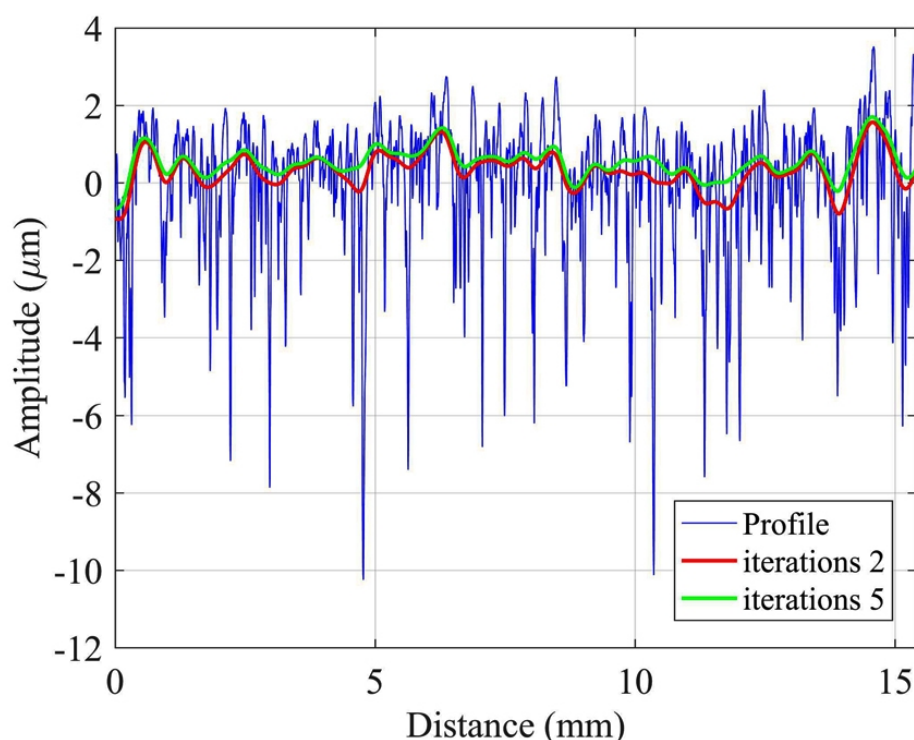


Рис. 11. Результат фильтрации регрессионным робастным фильтром Гаусса [13]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольшее применение для анализа шероховатости поверхности в настоящее время получил линейный фильтр Гаусса (ISO 16610-21:2015). Он включен во все прикладные программы мировых производителей измерительной техники. Вместе с тем ему присущи определенные ограничения. Первое ограничение связано с необходимостью предварительного исключения компоненты формы из первичного профиля. Второе ограничение обусловлено краевыми эффектами, для минимизации которых предложены три стратегии в ISO 16610-28:2016.

Робастный регрессионный фильтр Гаусса (ISO 16610-31:2016) предназначен в первую очередь для анализа мультифункциональных поверхностей. Он лишен ос-

нового недостатка линейных фильтров – краевых эффектов. В то же время он крайне чувствителен к выбросам и требует предварительного исключения компоненты формы из первичного профиля. При этом фильтр имеет сравнительно низкую производительность. Робастный регрессионный фильтр Гаусса рекомендуется использоваться для стратифицированных поверхностей вместо двухступенчатого фильтра Гаусса (ISO 13565-1:1996).

### БЛАГОДАРНОСТИ

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01269).*

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Захаров О.В., Яковишин А.С., Жуков А.В. Применение фильтров серии ISO 16610 для анализа структуры поверхности. Ч. 1. Обзор профильных фильтров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 2. С. 22-37.
2. Renishaw. Surface finish measurement. URL: <https://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/surface-finish-measurement>.
3. Whitehouse D.J. Handbook of Surface and Nanometrology, Second Edition, CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton FL, London, 2011.
4. Raja J., Radhakrishnan V. Digital filtering of surface profiles // Wear. 1979. Vol. 57. P. 147-155.
5. Марков Б.Н., Шулепов А.В. Алгоритмы робастной фильтрации профиля шероховатости // Измерительная техника, 2015. № 7. С. 4-7.
6. Jiang X. Robust solution for the evaluation of stratified functional surfaces. CIRP // Annals – Manufacturing Technology. 2010. Vol. 59. P. 573-576.
7. Seewig J. Linear and robust Gaussian regression filters // Journal of Physics: Conference Series. 2006. Vol. 13. P. 254-257.
8. Hüser D. Selected Filtration Methods of the Standard ISO 16610. 5 Precision Engineering, РТВ, 2016.
9. Повышение точности воспроизведения и передачи единицы длины в области измерений параметров шероховатости поверхности нанометрового диапазона контактными профилометрами / В.Г. Лысенко, В.А. Костеев, Е.А. Милованова, Н.А. Табачникова и др. // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 5 (173). С. 37-47.
10. Лукьянов В.С. Исследование влияния аппроксимации на погрешность измерения параметров шероховатости дискретным методом / В.С. Лукьянов, В.Г. Лысенко // Измерительная техника. 1982. № 2. С. 16-19.



11. Порошин В.В., Богомолов Д.Ю., Лысенко В.Г. Исследование погрешности фильтрации текстуры поверхности пространственным фильтром Гаусса // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 19-23.
12. Description and validation of a circular padding method for linear roughness measurements of short data lengths S. Schoeters, W. Dewulf, J.-P. Kruth, H. Haitjema, B. Voeckmans // Methods X. 2020. Vol. . P. 101122.
13. A review of digital filtering in evaluation of surface roughness / B. He, H. Zheng, S. Ding, R. Yang, Z. Shi // Metrology and Measurement Systems. 2021. Vol. 28. P. 217-253.
14. Krystek M. The digital implementation of the Gaussian profile filter according to ISO 11562. Beuth-Verlag, Berlin, 2005.
15. Никольский А.А., Королев В.В. Точный метод измерений на кругломерах формы поперечных сечений сложного профиля без предварительного центрирования // Измерительная техника. 2011. № 6. С. 24-29.
16. Захаров О.В., Погораздов В.В., Кочетков А.В. Методические основы гармонического анализа круглограмм // Метрология. 2004. № 6. С. 3-10.
17. Исследование методов повышения точности измерений геометрических параметров отклонения от круглости / В.Г. Лысенко, В.А. Костеев, Е.А. Милованова, Н.А. Табачникова и др. // Законодательная и прикладная метрология. 2022. № 2 (176). С. 26-33.
18. Захаров О.В., Пугин К.Г. Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников КАЧЕНИЯ // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 14-21.
19. Surface metrology closed profile Gaussian filter. MATLAB Central File Exchange. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52769-surface-metrology-closed-profile-gaussian-filter>.
20. Filter with variable transmission characteristics for determination of three-dimensional roughness / M. Numada, T. Nomura, K. Kamiya, H. Tashiro, H. Koshimizu // Precision Engineering. 2006. Vol. 30. P. 431-442.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Захаров Олег Владимирович** –  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Технология машиностроения»  
Саратовского государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.

**Oleg V. Zakharov** –  
Dr. Sci. Tech., Professor,  
Department of Mechanical Engineering  
Technology, Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

## **Машиностроение**

---

**Яковишин Александр Сергеевич** –  
ассистент кафедры «Технология  
машиностроения» Саратовского  
государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.

**Alexander S. Yakovishin** –  
Assistant Lecturer, Department  
of Mechanical Engineering Technology,  
Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

**Жуков Андрей Владимирович** –  
студент Саратовского  
государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.

**Andrey V. Zhukov** –  
Undergraduate,  
Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 18.07.2022, принята к опубликованию 30.08.2022*



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

## **ПОЛИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ВРАЩЕНИЯ С АЛМАЗНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

***Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований процесса механохимического полирования поликристаллического алмазного PVD покрытия деталей типа тел вращения. В качестве инструмента используется чашечная металлическая щетка. Инструменту придают вращение вокруг своей оси, а заготовку вращают и перемещают вдоль оси вращения. В результате этого за короткое время достигается шероховатость, соответствующая полированной поверхности. Показано, что наиболее значимое влияние на шероховатость поверхности оказывают скорость вращения и поперечная подача инструмента, а скорость вращения заготовки оказывает меньшее влияние.*

***Ключевые слова:** полирование, алмазное покрытие, шероховатость поверхности, эксперимент, режим обработки*

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

## **POLISHING ROTATION PARTS WITH DIAMOND COATING**

***Abstract.** The article presents the results of experimental studies relating the process of mechanical and chemical polishing of the polycrystalline diamond PVD coating of parts such as bodies of revolution. A cup metal brush is used as a polishing tool that is rotated around its axis, and the workpiece is rotated and moved along the rotation axis. As a result, the roughness corresponding to the polished surface is achieved within a short time. It is shown that the most significant influence on the surface roughness is exerted by the rotation speed and transverse feed of the tool, whereas the rotation speed of the workpiece has a lesser effect.*

***Keywords:** polishing, diamond coating, surface roughness, experiment, processing mode*

В последнее время большое распространение среди ведущих мировых лидеров машиностроительного производства получил метод PVD – вакуумный метод физическо-

го нанесения высокопрочного поликристаллического алмазного покрытия из паровой фазы. Недостатком этого метода является то, что созданное данным методом покрытие изначально имеет недостаточно низкую шероховатость. Поэтому после нанесения этого покрытия для уменьшения шероховатости поверхность детали должна пройти технологическую операцию полирования

### ВВЕДЕНИЕ

Полирование поверхности, покрытой алмазоподобным покрытием, до недавнего времени представляло собой довольно сложную технологическую задачу. Причиной этого является его высокая твердость. Из-за высокой твердости покрытия существующие методы полирования алмаза алмазными пастами [1-3] или сухого полирования в неподвижной абразивной среде [4] не обеспечивают достаточно низкой шероховатости поверхности и малопродуктивности. Поэтому на смену им предложены другие методы, наиболее перспективным из которых является метод термохимической обработки [5-8].

Способ термохимической обработки основан на свойстве алмаза растворяться в переходных металлах под действием температурного фактора. Осуществляется этот способ следующим образом: к плоской обрабатываемой поверхности неподвижной заготовки прижимается вращающийся диск, изготовленный из переходного металла – железа, никеля, титана и других. За счет трения диска с заготовкой в зоне обработки повышается температура, достаточная для осуществления процесса полирования. Недостатком этого метода является низкая производительность, возможность потери точности обрабатываемой поверхности из-за погрешности взаимного расположения заготовки и инструмента, а также то, что данный метод ограничен обработкой только плоских поверхностей.

В качестве развития термохимического метода авторами предложен механохимический метод полирования поликристаллического алмазного покрытия деталей вращения. Сущность этого метода заключается в том, что обработку вращающейся поверхности заготовки осуществляют вращающимся инструментом в виде металлической щётки, щетинки которой изготовлены из переходного металла. За счет трения инструмента об обрабатываемую поверхность на поверхности трения возникает температура, достаточная для осуществления термохимического процесса сглаживания микронеровностей.

Но ввиду высокой хрупкости алмазного покрытия в начале этой обработки наиболее выступающие микронеровности скалываются под действием ударов щетинок инструмента. Тем самым решается проблема повышения производительности обработки. Кроме того, отпадает необходимость точной установки взаимного положения

заготовки и инструмента и расширяются технологические возможности способа, так как полирование этим методом можно осуществлять не только плоских поверхностей, но и поверхностей вращения, и фасонных поверхностей.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Способ полирования осуществляется следующим образом. Заготовка в виде стержня диаметром 14 мм закреплялась в поворотном устройстве, установленном на столе вертикально-фрезерного станка модели 615П. На цилиндрическую поверхность заготовки на высокотехнологичной установке DREVA 600 LAM германского производства было нанесено поликристаллическое алмазное покрытие типа ta-C Diamor. Толщина покрытия составляла 2-3 мкм. В качестве инструмента использовалась чашечная металлическая щетка, установленная на станке вместо фрезы. Щетка изготовлена из стальной проволоки марки ЗК-7 Б-3-0,5 ГОСТ 9389-75 с закручивающимся узлом и с длиной обрезки 25 мм.

Основным контролируемым параметром в данном эксперименте является шероховатость обрабатываемой поверхности. Шероховатость поверхности замерялась профилометром Surftest SJ210 компании Mitutoyo по параметру Ra. На обработанной поверхности измерение шероховатости проводилось 3 раза. Из трех измерений для дальнейшего вычисления использовалось среднее значение.

Экспериментальные исследования и обработка полученных результатов осуществлялись по общепринятой методике рационального планирования эксперимента  $2^{3-1}$  [9]. Используемые в процессе эксперимента режимы обработки приведены в таблице. Варьируемыми факторами являлись окружная скорость вращения инструмента, окружная скорость вращения заготовки и поперечная подача инструмента. Продольная подача образца использовалась постоянной, равной 300 мм/мин.

Принятые режимы обработки

Варьируемые факторы эксперимента	Обозначения	Используемые значения факторов	
		минимальное	максимальное
Скорость вращения инструмента, м/мин		110	220
Поперечная подача, мм/дв. ход	$t$	0,5	1,0
Скорость вращения образца, мм/мин	$V_d$	200	400

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уравнение регрессии представляло собой линейную зависимости шероховатости поверхности от варьируемых факторов. В процессе статистической обработки экспериментальных данных с принятым уровнем значимости 5 % оценивались: однородность дисперсий по критерию Кохрена, значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента, адекватность модели по критерию Фишера.

После обработки результатов эксперимента получена следующая регрессионная зависимость:

$$Ra = 0,17 - 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot V_d - 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot V_i - 5,1 \cdot 10^{-2} \cdot t$$

где  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение микропрофиля обработанной поверхности образца, мкм;  $V_d$  – скорость вращения образца, мм/мин;  $V_i$  – скорость вращения инструмента, м/мин;  $t$  – величина поперечной подачи инструмента, мм/дв. ход.

Для обеспечения наглядности уравнение регрессии представлено в графическом виде. На рис. 1 показано влияние на шероховатость обработанной поверхности скорости вращения инструмента.

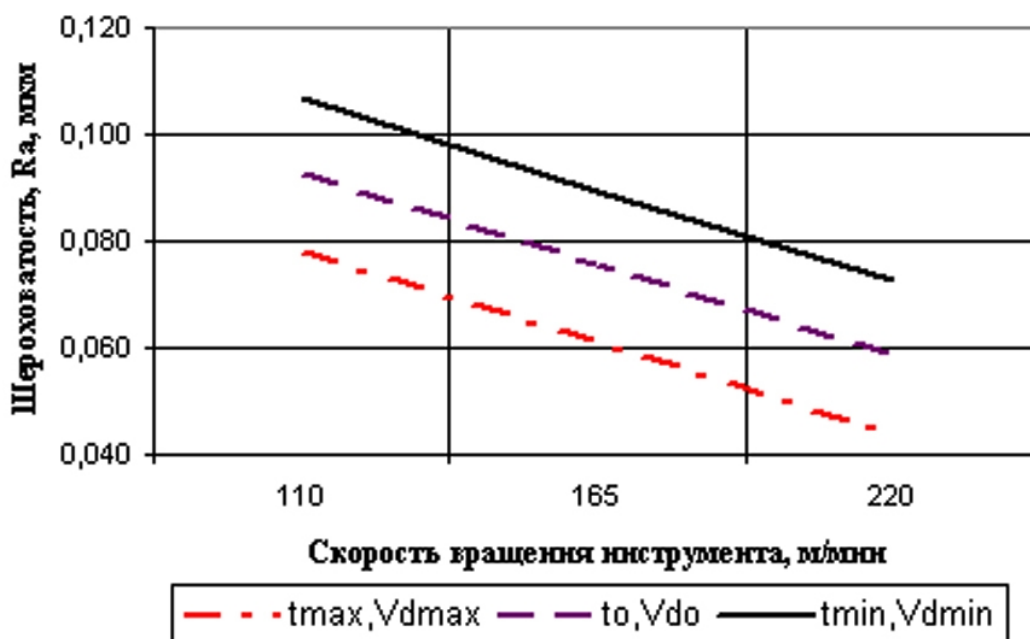


Рис. 1. Влияние на величину среднего арифметического отклонения микропрофиля обработанной поверхности  $Ra$ , мкм, скорости вращения инструмента  $V_i$ , м/мин, при максимальных, средних и минимальных значениях поперечной подачи инструмента  $t$ , мм, и скорости вращения образца  $V_d$ , мм/мин

Из рис. 1 следует, что при возрастании скорости вращения инструмента шероховатость поверхности уменьшается. Это объясняется тем, что с возрастанием скорости вращения инструмента увеличивается сила удара щетинок металлической щётки о вершины микронеровностей поверхности образца, в результате чего на первом этапе обработки даже более мелкие вершинки микронеровностей подвергаются интенсивному хрупкому разрушению.

Следовательно, на втором этапе обработки требуется меньше времени для осуществления химико-термического полирования поликристаллического алмазного покрытия. Кроме того, возрастает интенсивность процесса химико-термического полирования, так как с возрастанием скорости вращения инструмента увеличивается температура в зоне трения инструмента с обрабатываемой поверхностью. Все это приводит к значительному влиянию скорости вращения инструмента на шероховатость обработанной поверхности поликристаллического алмазного покрытия детали.

Из рис. 1 также следует, что возрастание величины поперечной подачи инструмента и окружной скорости вращения образца также способствует снижению шероховатости обработанной поверхности. Более наглядно это представлено на рис. 2 и 3.

На рис. 2 показана зависимость шероховатости обработанной поверхности алмазного покрытия от поперечной подачи инструмента. Из рис. 2 видно, что с возрастанием поперечной подачи инструмента шероховатость обработанной поверхности уменьшается. Объясняется это тем, что с возрастанием поперечной подачи щетинок инструмента в большей степени упруго деформируются и с большей силой прижимаются к обрабатываемой поверхности. Это приводит к появлению более жесткого удара щетинок о вершины микронеровностей обрабатываемой поверхности, что обеспечивает более интенсивное скалывание наиболее выступающих вершинок. Кроме того, возрастает давление щетинок инструмента на обрабатываемую поверхность, что приводит к повышенному трению инструмента с заготовкой и, как следствие, к увеличению значения температуры в зоне обработки. Это способствует повышению интенсивности процесса термохимического полирования поверхности. Следовательно, с увеличением поперечной подачи, как и с увеличением скорости вращения инструмента, на исследуемый процесс обработки оказывают влияние сразу два фактора – механический и термохимический, что приводит к значительному снижению шероховатости обрабатываемого поликристаллического алмазного покрытия и одновременно к возрастанию производительности процесса полирования этой поверхности.

На рис. 3 представлено влияние скорости вращения образца на шероховатость обработанной поверхности.

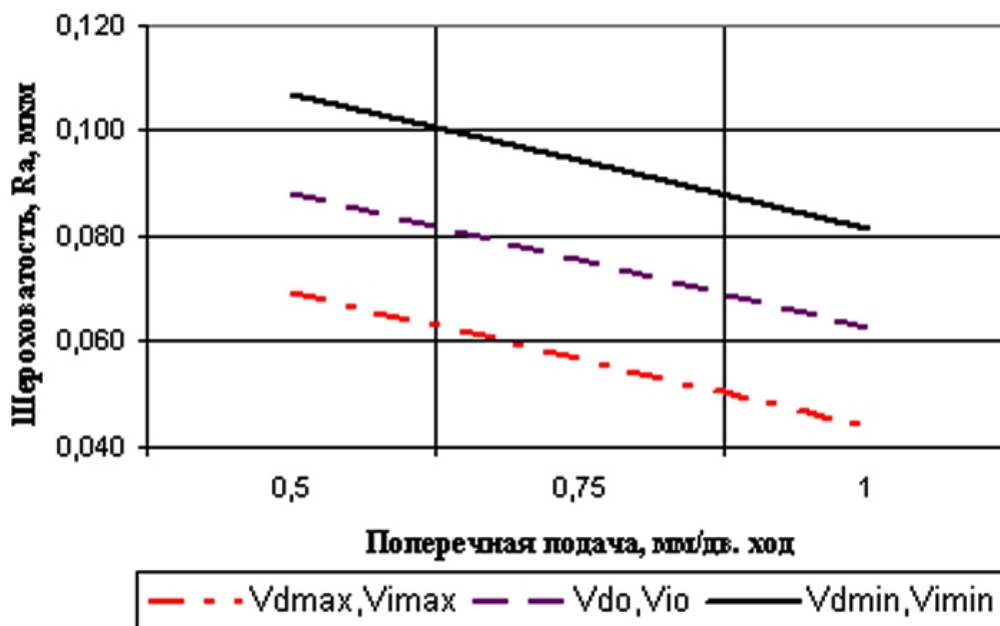


Рис. 2. Влияние на величину среднего арифметического отклонения микропрофиля обработанной поверхности  $R_a$ , мкм, величины поперечной подачи инструмента  $t$ , мм/дв. ход, при максимальных, средних и минимальных значениях окружной скорости вращения инструмента  $V_i$ , м/мин, и окружной скорости вращения образца  $V_d$ , мм/мин

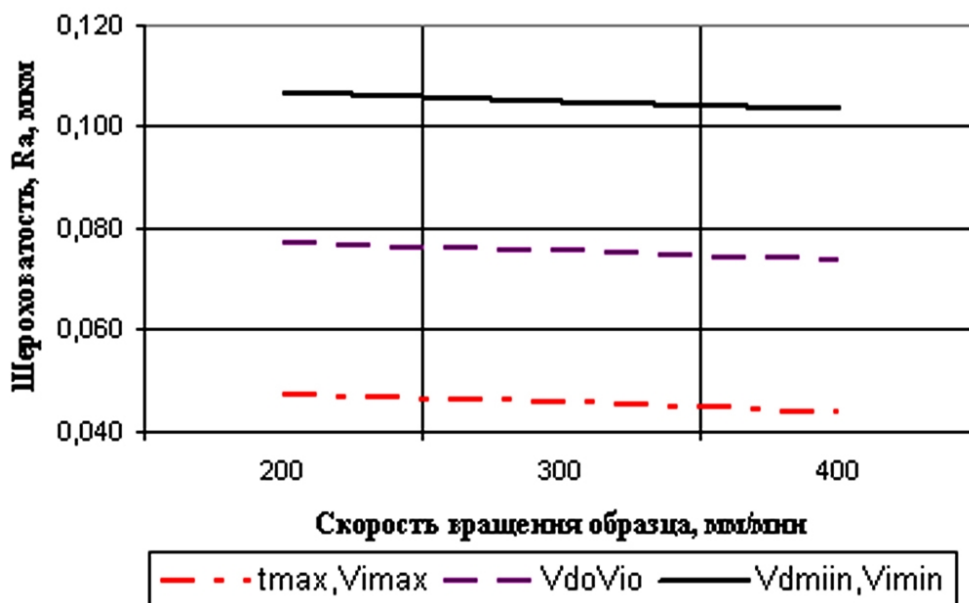


Рис. 3. Зависимость среднего арифметического отклонения микропрофиля  $R_a$ , мкм, обработанной поверхности от скорости вращения образца  $V_d$ , мм/мин, при различных сочетаниях поперечной подачи инструмента  $t$ , мм, и окружной скорости вращения инструмента  $V_i$ , м/мин

Из рис. 3 следует, что с увеличением скорости вращения образца шероховатость обработанной поверхности снижается, но в меньшей степени, чем при возрастании других исследуемых факторов. Объясняется это тем, что скорость вращения образца существенно меньше, чем скорость вращения инструмента, поэтому она слабо влияет на суммарную скорость взаимодействия инструмента и образца, а следовательно, и на механический и термохимический факторы снижения шероховатости поверхности.

Выполненные исследования показывают высокую эффективность использования предложенного способа полирования алмазного поликристаллического покрытия. При обработке данным методом используется два самых слабых свойства алмаза: его хрупкость и способность растворяться в переходных металлах. Поэтому шероховатость образцов значительно снижается, ввиду протекания в зоне обработки сразу двух процессов: механического и термохимического.

В начале обработки превалирует механический процесс, в результате которого происходит скалывание наиболее выступающих алмазных вершин микронеровностей. Затем, с увеличением температуры в зоне обработки, усиливает своё влияние термохимический процесс, приводящий к графитизации оставшихся после скалывания мелких вершин микронеровностей обрабатываемой поверхности. Таким образом, в результате действия двух факторов происходит повышение производительности обработки и достижение низкого уровня шероховатости поликристаллического алмазного покрытия.

## **ВЫВОДЫ**

В результате выполненного экспериментального исследования выяснено влияние различных технологических факторов на качество обработки поликристаллического алмазного покрытия деталей вращения. Регулируя режим обработки, можно достичь различного уровня шероховатости полированной поверхности. Для достижения минимально возможного значения шероховатости рекомендуется следующий режим обработки: скорость вращения инструмента 220 м/мин, поперечная подача – 1 мм/дв. ход, скорость вращения заготовки – 400 мм/мин, скорость продольной подачи – 300 мм/мин.

Результаты исследований в настоящее время используются на операции доводки деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей и рабочей поверхности твердосплавных фрез с поликристаллическим алмазным покрытием. Дальнейшее исследование предложенной технологии позволит существенно расширить область ее практического применения.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Failure mechanisms of cvd diamond wafers and thin films during polishing / Y. Chen, W. Liu, H. Feng, L. Zhang // *Machining Science and Technology*. 2015. Т. 19. № 1. С. 152-173.
2. Formation of flat surfaces of optoelectronic components in diamond polishing / Y.D. Filatov, V.I. Sidorko, S.V. Kovalev, A.G. Vetrov // *Journal of Superhard Materials*. 2017. Т. 39. № 2. С. 129-133.
3. Епифанов В.И., Лесина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. Москва: Высшая школа, 1987.
4. Кирсанов С.В., Гончаренко И.М., Бабаев А.С. Влияние «сухого» полирования твердосплавных образцов на характеристики износостойкого покрытия // *Справочник. Инженерный журнал*. 2013. № 4. С. 16-19.
5. Дерябкин А.В. Диффузионная термохимическая обработка поверхности алмаза // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2018. № 4. С. 35-37.
6. Дерябкин А.В., Федоров Ю.Ю., Темиряева М.П. Исследование зависимости шероховатости поверхности алмаза при термохимической обработке на никелевых и железных поверхностях разного класса чистоты // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2018. № 1. С. 550-551.
7. Two-Step Polishing Technique for Single Crystal Diamond (100) Substrate Utilizing a Chemical Reaction with Iron Plate / A. Kubota, S. Nagae, S. Motoyama, M. Touge // *Diamond and Related Materials*. 2015. № 60. С. 75-80.
8. A Comprehensive Study of Mechanical and Chemo-Mechanical Polishing of CVD Diamond / S. Roy, V.K. Balla, A.K. Mallik, N. Dandapat, V.G. Ralchenko, A.P. Bolshakov, E.E. Ashkinazi // *Materials Today: Proceedings*. 2018. 9846-9854.
9. Спиридонов А.А. Планирование экспериментов при исследовании технологических процессов. Москва: Машиностроение, 1981. 184 с.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Королев Альберт Викторович** – доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Albert V. Korolev** – Dr. Sci. Tech., Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Department of Mechanical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov



**Охлупин Дмитрий Николаевич** –  
директор ООО «ТехноТерм-Саратов»

**Dmitry N. Okhlupin** –  
Director of TekhnoTerm-Saratov LLC

**Синев Илья Владимирович** –  
кандидат технических наук, доцент  
Саратовского национального исследова-  
тельского государственного университета  
имени Н.Г. Чернышевского

**Ilya V. Sinev** –  
PhD (Technical Sciences),  
Associate Professor,  
Saratov National Research State  
University named after  
N.G. Chernyshevsky

**Авдонин Кирилл Андреевич** –  
аспирант Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.

**Kirill A. Avdonin** –  
Postgraduate,  
Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 04.08.2022, принята к опубликованию 12.09.2022*

# ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

---

УДК: 546.742; 621.319.45

**М.А. Джармухамбетова, М.А. Викулова, Н.В. Горшков**

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДОВ НА ОСНОВЕ НАНОПОРИСТОГО ГИДРОКСИДА НИКЕЛЯ

*Аннотация.* В работе проведено сравнительное исследование электрохимических свойств композиционных электродных материалов на основе  $Ni(OH)_2$  трех различных производителей в качестве активного компонента с углеродной добавкой и полимерным связующим. Порошки гидроксида никеля (II) предварительно исследованы методами РФА, СЭМ и лазерной дифракции. Электрохимические характеристики полученных электродов определены методом циклической вольтамперометрии. Емкость исследованных электродов на основе гидроксидов никеля (II) варьируется от 15,5 до 17  $F/cm^2$  в зависимости от морфологии и размера частиц основного материала.

**Ключевые слова:** гидроксид никеля (II), морфология, электрод, емкость, суперконденсатор

**M.A. Dzharmuhambetova, M.A. Vikulova, N.V. Gorshkov**

## ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF ELECTRODES BASED ON NANOPOREUS NICKEL HYDROXIDE

*Abstract.* This research is devoted to a comparative study of electrochemical properties of composite electrode materials based on  $Ni(OH)_2$  of three different manufacturers as an active component with a carbon additive and a polymer binder. Nickel (II) hydroxide powders were preliminarily studied by XRD, SEM, and laser diffraction. Electrochemical characteristics of the obtained electrodes were determined by the cyclic voltammetry method. The capacitance of the studied electrodes based on nickel (II) hydroxides varies from 15,5 to 17  $F/cm^2$  depending on the morphology and particle size of the base material.

**Keywords:** nickel (II) hydroxide, morphology, electrode, capacitance, supercapacitor

## ВВЕДЕНИЕ

Гидроксид никеля (II) ( $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ), как один из наиболее распространенных гидроксидов переходных металлов, привлекает все большее внимание в связи с его применением в качестве активного материала положительного электрода в щелочных перезаряжаемых батареях на основе никеля. В настоящее время проведены значительные исследования по составам электродов из гидроксида никеля (II) и разработано несколько методов их приготовления [1-5]. Известно, что гидроксид никеля (II) имеет гексагональную слоистую структуру с двумя полиморфными модификациями [6]. Чистый  $\alpha\text{-Ni}(\text{OH})_2$  очень нестабилен в воде и щелочи и быстро переходит в  $\beta$ -фазу. Помимо кристаллической структуры, морфология  $\beta\text{-Ni}(\text{OH})_2$  также оказывает значительное влияние на его электрохимические свойства [7, 8]. Сообщалось, что для использования в аккумуляторах выгодна сферическая структура [9, 10]. Сферы  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  часто синтезируют по растворной технологии по механизму комплексообразования-осаждения, в котором  $\text{NiSO}_4$  и  $\text{NaOH}$  выступают в качестве реагентов, а  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  как комплексообразователь.

В последнее время наноструктурные электродные материалы привлекают внимание и научный интерес из-за их потенциала в повышении работоспособности аккумуляторных батарей и для изготовления микро- и нанобатарей [11-13]. Обнаружено, что  $\beta\text{-Ni}(\text{OH})_2$ , характеризующийся меньшим размером кристаллов, проявляет лучшие электрохимические свойства. В связи с этим многие работы посвящены синтезу нанокристаллов  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ , в том числе наноразмерных  $\beta\text{-Ni}(\text{OH})_2$  [14], наностержней [15], нанолистов [16], нанотрубок [17], наночешуек [18] и нанолент [19]. Поэтому исследование морфологии и размера частиц активного компонента – обязательная предварительная стадия электрохимических работ.

В настоящее время большинство электрохимических исследований проведено с использованием композитного электрода, состоящего из частиц гидроксида никеля (II), органического связующего и электропроводящей добавки. Однако эффективность заряда/разряда пастообразного электрода снижается из-за выделения кислорода при повышенных температурах. В связи с этим необходимы дополнительные исследования и разработки новых составов и вариантов смешения электродных масс, которые могли бы обладать высокой электрической емкостью, а также минимальным временем зарядки. В качестве основного компонента таких материалов может быть использован гидроксид никеля (II), а также различные комбинации с ним полимеров, углерода и прочих добавок.

Целью данной работы является исследование электрохимических свойств электродов на основе гидроксида никеля (II) трех различных производителей, углерода и раствора фторопласта, изготовленных методом каландрирования и прессования на никелевую сетку.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Порошки Ni(OH)<sub>2</sub> трех различных производителей Foshan Qiruide Additives Co., LTD (Китай), Changsha Easchem Co., Limited (Китай) и АИТ-413 (Россия) [20] предварительно исследованы методами рентгеновского фазового анализа с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific (Швейцария) сканирующей электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа ASPEX Explorer (США) и лазерной дифракции с использованием лазерного анализатора размера частиц Analysette 22 MicroTec PLUS Fritch (Германия).

По рентгеновским дифрактограммам образцов вычислены размеры областей когерентного рассеяния в соответствии с методикой [21] с использованием уравнения Шеррера:

$$d_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения (CuK $\alpha$ ,  $\lambda = 0,15412$  nm);  $\beta$  – ширина дифракционного пика на полувысоте;  $\theta$  – угол дифракции;  $k$  – безразмерный коэффициент формы частиц, который для сферических кристаллитов равен 0,9.

Электроды изготовлены путем каландрирования смеси активного материала гидроксида никеля и электропроводящей сажи Carbon Black Printex в массовом соотношении 8:1 с добавкой одной массовой части фторопласта из 60 % дисперсии марки Ф-4Д (АО «ГалоПолимер Пермь») до получения равномерного по толщине однородного листового материала.

Электрохимические свойства электродов исследованы методом циклической вольтамперометрии с использованием потенциостата-гальваностата ПИ-50-Pro (Россия) в трехэлектродной ячейке с графитовым вспомогательным электродом и хлорсеребряным электродом сравнения. В качестве электролита использовался 6М раствор КОН.

Удельная емкость (в Ф/см<sup>2</sup>) в циклической вольтамперометрии определена по уравнению 2:

$$C_{эл} = \frac{\int IdU}{2S_{эл}\Delta Uv} \quad (2)$$

где  $I$  – величина тока гальваностатического разряда (мА),  $U$  – потенциал (В),  $S_{эл}$  – площадь электрода (см<sup>2</sup>),  $\Delta U$  – окно потенциала кривой циклической вольтамперограммы (мВ),  $v$  – скорость сканирования (мВ/с).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фазовый состав и структура исследованных гидроксидов никеля (II) трех производителей подтверждены методом рентгеновского фазового состава (рис. 1).

Анализ полученных дифрактограмм подтверждает структуру  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  с гексагональной решеткой 164-й пространственной группы (P-3m) с параметрами решетки  $a = 3,13 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,63 \text{ \AA}$  и углами по  $90^\circ$ .

На дифрактограммах всех исследованных образцов обнаруживаются рефлексы, соответствующие плоскостям (001), (100), (011), (012), (110), (111), для которых рассчитаны значения размеров кристаллитов в образцах  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  различных производств (таблица).

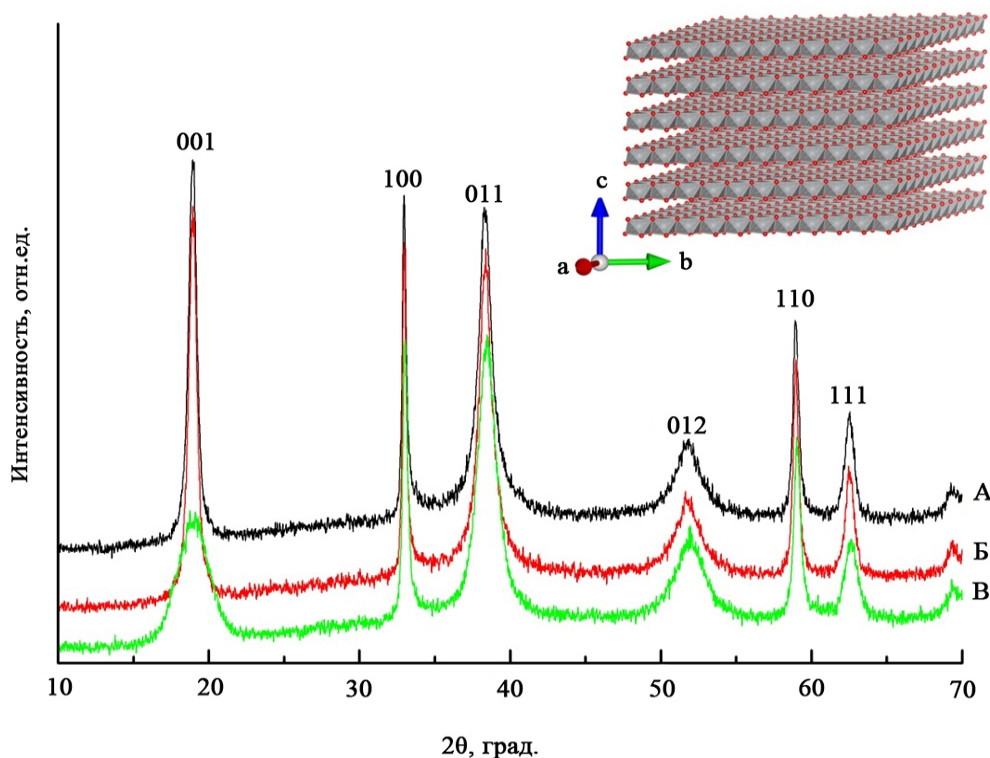


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  производства «FQAC» (А), «Changsha Easchem» (Б) и «АИТ-413» (В)

Рассчитанные значения размеров кристаллитов в образцах  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  различных производств

Индексы Миллера	Положение пика, град.	Размер кристаллита, нм		
		FQAC	Changsha Easchem	АИТ-413
001	18,9	11,83	11,47	3,24
100	33,0	24,74	24,75	20,01
011	38,3	7,21	7,23	5,44
012	51,8	4,19	4,12	3,70
110	59,0	18,52	18,56	16,13
111	62,5	11,95	12,93	8,72

По данным таблицы видно, что размер кристаллитов гидроксида никеля (II) Китайских производств различается незначительно, при этом аналогичная величина для ма-

териала Российского производства заметно снижается, особенно для плоскости (001), что можно объяснить отличающейся морфологией частиц.

Электронные микрофотографии частиц гидроксида никеля (II) трех образцов различных производителей при разном увеличении показаны на рис. 2.

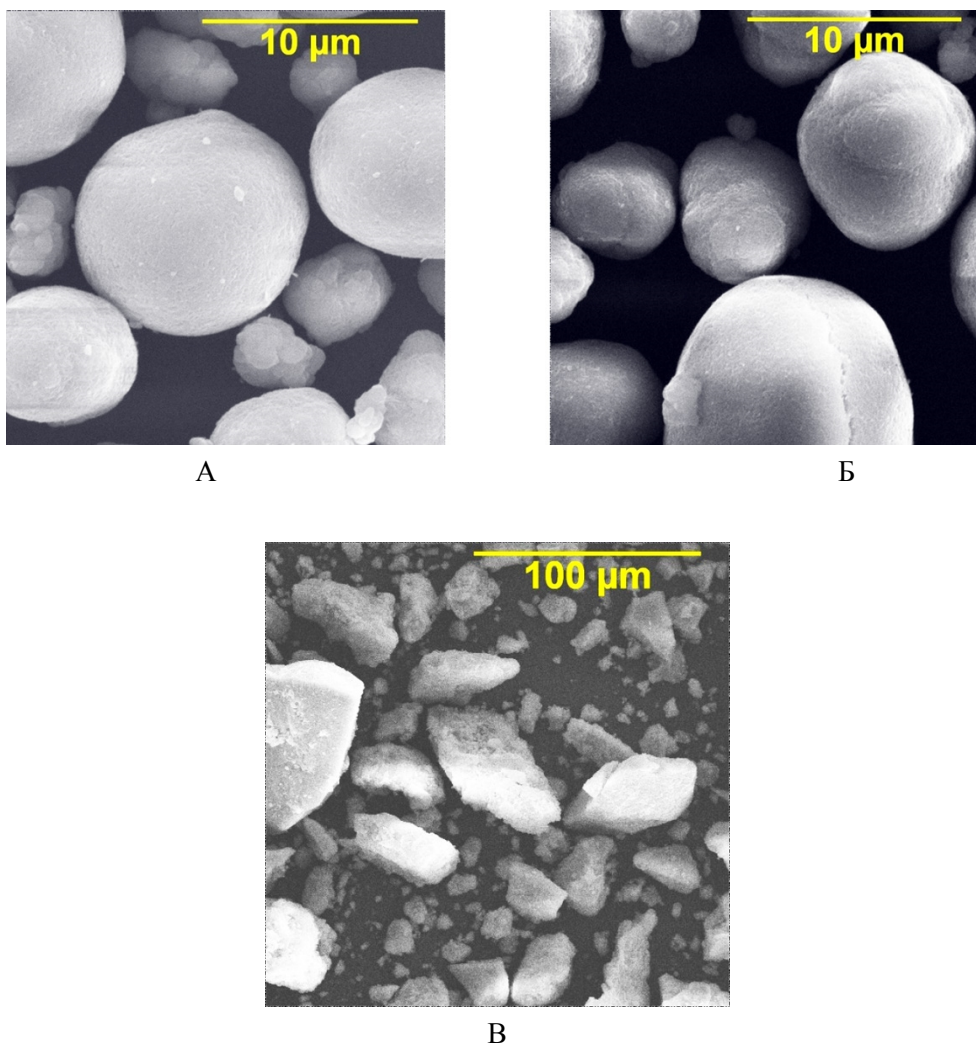


Рис. 2. СЭМ изображения частиц порошка  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  производства «FQAC» (А), «Changsha Easchem» (Б) и «АИТ-413» (В)

Согласно электронным микрофотографиям, частицы гидроксида никеля (II) двух китайских производств имеют сферическую морфологию со средним диаметром сфер около 10 мкм.  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  Российского производства АИТ характеризуется частицами неправильной формы, склонными к агломерации, отсюда их размеры варьируются в широких пределах.

Размеры частиц  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ , оцененные по СЭМ, согласуются с данными распределения частиц по размерам, которые определены методом лазерной дифракции (рис. 3).

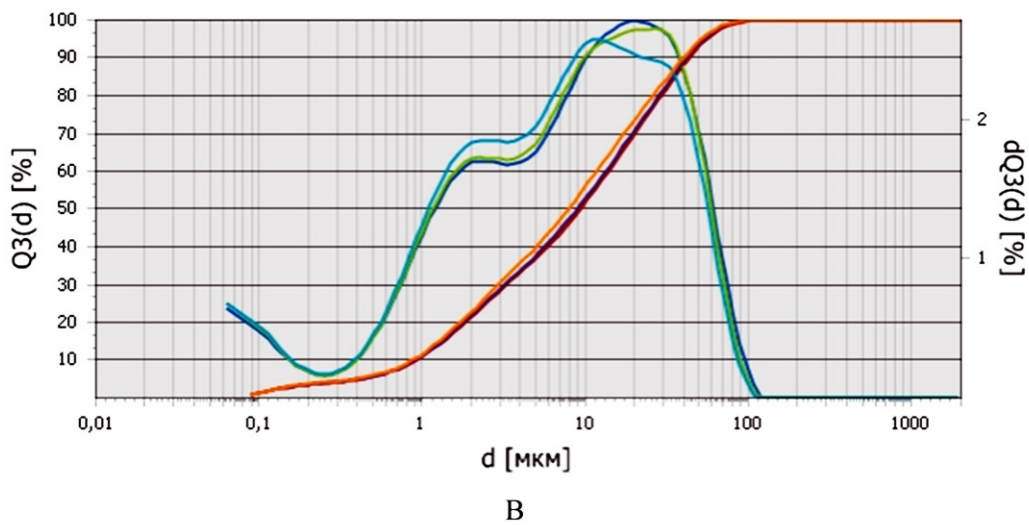
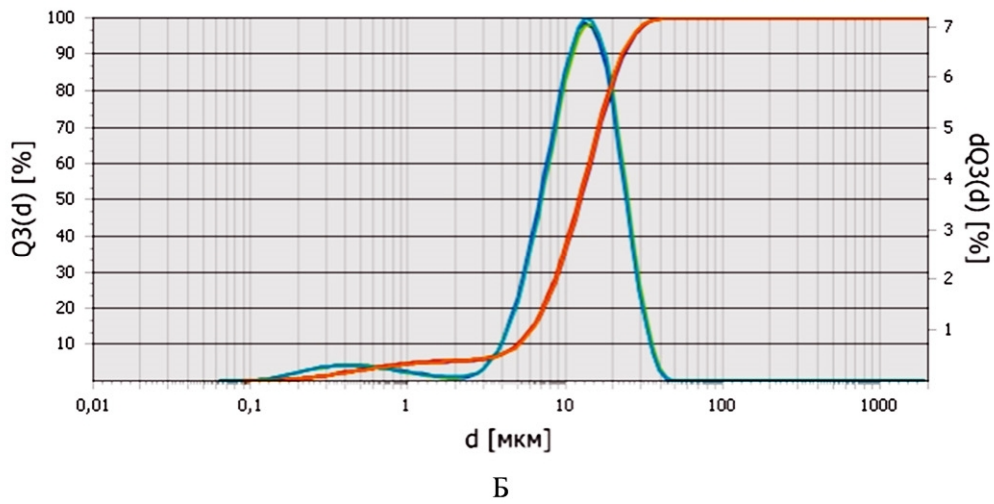
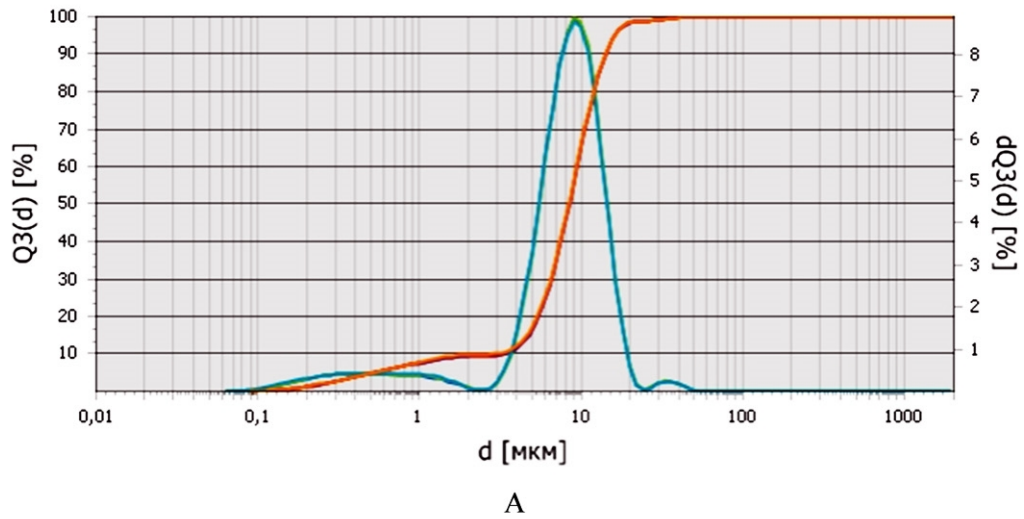


Рис. 3. Распределение частиц по размерам порошка  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  производства «FQAC» (А), «Changsha Easchem» (Б) и «АИТ-413» (В)



Гидроксид никеля (II) производства FQAC и Changsha Easchem имеют преимущественно одномодальное распределение частиц по размерам с наиболее вероятным размером частиц около 9 и 14 мкм, соответственно. Образец АИТ-413 демонстрирует двумодальное распределение с максимума в районе 2 и 20 мкм, а также плечо в области наноразмерного диапазона. Результаты циклической вольтамперометрии (ЦВА) трех образцов гидроксида никеля (II), а также построенные по ним кривые зависимости емкости электрода от скорости развертки представлены на рис. 4.

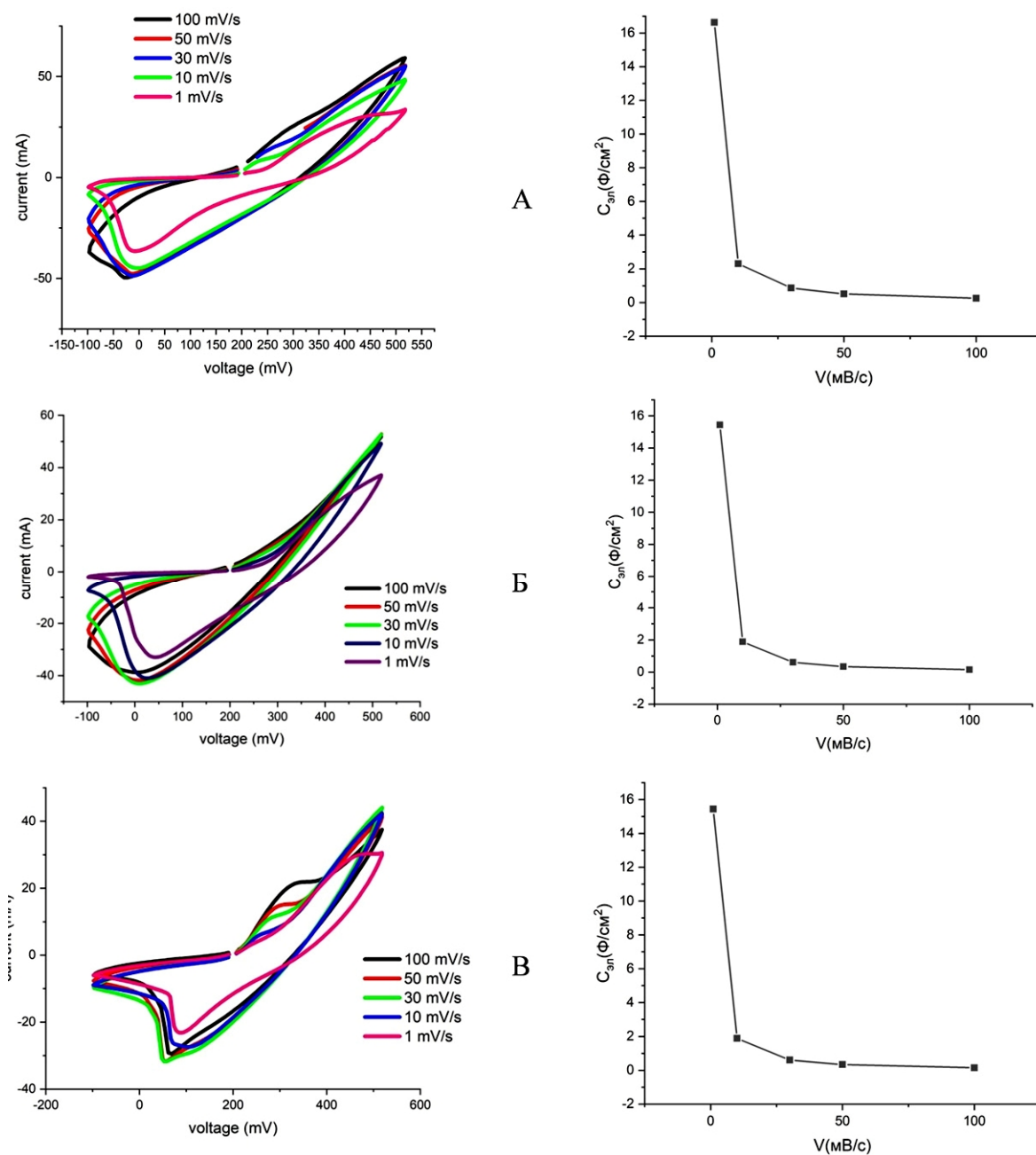


Рис. 4. Результаты циклической вольтамперометрии (левый столбец) и график зависимости емкости от скорости сканирования (правый столбец) для электродов на основе порошков  $Ni(OH)_2$  производства «FQAC» (А), «Changsha Easchem» (Б) и «АИТ-413» (В)



Циклические вольтамперные кривые находятся в диапазонах силы тока от -50 до 50 мА и потенциала от -100 до 550 мВ и разбиваются на 4 участка. Первый участок кривой начинается от минимальных значений потенциала (-100 мВ) и постепенно возрастает до места изгиба графика, характеризуемого средним значением потенциала (200 мВ). Второй участок начинается от места изгиба графика и до достижения потенциала реверса и характеризуется резким возрастанием силы тока, достигая максимального значения в 50 мА. Третий участок графика характеризуется падением потенциала до 0 и силы тока приблизительно до -50 мА. И четвертый участок замыкает вольтамперную кривую и характеризуется возвращением к исходным данным, то есть падением потенциала до -100 мВ и силы тока до начального значения, также образуя пик, положение которого меняется от скорости и незначительно от марки гидроксида.

По результатам анализа ЦВА рассчитана емкость электродов, при этом для скорости 1 мВ/с значение емкости максимально, что подтверждает лимитирование накопления псевдоемкости диффузионными процессами в объеме активного электродного материала. Видим, что самой большой емкостью обладает электрод на основе образца гидроксида никеля (II) производства FQAC (около 17 Ф/см<sup>2</sup>). Электрод на основе гидроксида никеля (II) производителя Changsha Easchem, так же как и образец АИТ-413, имеют емкость 15,5 Ф/см<sup>2</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы морфологические характеристики порошков гидроксида никеля (II) трех различных производителей методами РФА, СЭМ и лазерной дифракции. По анализу полученных дифрактограмм подтверждена структура Ni(OH)<sub>2</sub> с гексагональной решеткой 164-й пространственной группы (P-3m) с параметрами решетки  $a = 3,13 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,63 \text{ \AA}$  и углами по 90°. Согласно данным СЭМ и лазерной дифракции, порошок гидроксида никеля (II) производителя FQAC имеет частицы сферической формы с гладкой поверхностью размером около 9 мкм. У образца производителя Changsha Easchem частицы также имеют шарообразную форму, имеющую незначительные дефекты на поверхности и размер частиц порядка 14 мкм. Образец АИТ-413 имеет частицы различной формы с дефектами, сколами, отслоениями на поверхности и средним размером частиц 23 мкм.

Изготовлены электроды на основе гидроксида никеля (II) трех различных производителей, углерода и раствора фторопласта методом каландрирования и прессования на никелевую сетку. Определены электрохимические свойства полученных электродов методом циклической вольтамперометрии.

По результатам анализа ЦВА рассчитана емкость электродов. Самая наибольшая емкость наблюдается у электрода на основе образца гидроксида никеля (II) FQAC (около

17 Ф/см<sup>2</sup>). Электроды на основе гидроксида никеля (II) производителя Changsha Easchem и образец АИТ-413 имеют емкость 15,5 Ф/см<sup>2</sup>.

Таким образом, электрохимические характеристики электродных материалов определяются не только химическим составом активного материала, но и морфологией и размером его частиц.

По результатам исследования установлено, что гидроксид никеля (II) с оптимальными параметрами частиц может выступать перспективным активным компонентом композиционного электродного материала для суперконденсаторов.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Preparation, characterization and electrolytic behavior of  $\beta$ -nickel hydroxide / R. Acharya, T. Subbaiah, S. Anand, R.P. Das // Journal of power sources. 2002. V. 109. № 2. P. 494-499.

2. Characterisation of nickel hydroxide precipitated from solutions containing Ni<sup>2+</sup> complexing agents / T. Subbaiah, R. Mohapatra, S. Mallick, K.G. Misra, P. Singh, R.P. Das // Hydrometallurgy. 2003. V. 68. № 1-3. P. 151-157.

3. Effect of synthesis temperature on the phase structure and electrochemical performance of nickel hydroxide / Y. Li, Q. Yang, J. Yao, Z. Zhang, C. Liu // Ionics. 2010. V. 16. № 3. P. 221-225.

4. Synthesis and electrochemical performance of mixed phase  $\alpha/\beta$  nickel hydroxide / Y. Li, J. Yao, Y. Zhu, Z. Zou, H. Wang // Journal of Power Sources. 2012. V. 203. P. 177-183.

5. Effect of synthesis conditions on characteristics of the precursor material used in NiO·OH/Ni(OH)<sub>2</sub> electrodes of alkaline batteries / M. Freitas, R.S. e Silva, D.M. Anjos, A. Rozario, P.G. Manoel // Journal of power sources. 2007. V. 165. № 2. P. 916-921.

6. Rajamathi M., Kamath P.V., Seshadri R. Polymorphism in nickel hydroxide: role of interstratification // Journal of Materials Chemistry. 2000. V. 10. № 2. P. 503-506.

7. Lee G., Varanasi C.V., Liu J. Effects of morphology and chemical doping on electrochemical properties of metal hydroxides in pseudocapacitors // Nanoscale. 2015. V. 7. № 7. P. 3181-3188.

8. Phase distribution and electrochemical properties of Al-substituted nickel hydroxides / L.J. Yang, X.P. Gao, Q.D. Wu, H.Y. Zhu, G.L. Pan // The Journal of Physical Chemistry C. 2007. V. 111. № 12. P. 4614-4619.

9. Microvoltammetric study of electrochemical properties of a single spherical nickel hydroxide particle / H.S. Kim, T. Itoh, M. Nishizawa, M. Mohamedi, M. Umeda, I. Uchida // International journal of hydrogen energy. 2002. V. 27. № 3. P. 295-300.

10. Spherical Al-substituted  $\alpha$ -nickel hydroxide with high tapping density applied in Ni-MH battery / X.H. Wu, Q.P. Feng, M. Wang, G.W. Huang // *Journal of Power Sources*. 2016. V. 329. P. 170-178.
11. Kiani M.A., Mousavi M.F., Ghasemi S. Size effect investigation on battery performance: Comparison between micro-and nano-particles of  $\beta$ -Ni(OH)<sub>2</sub> as nickel battery cathode material // *Journal of Power Sources*. 2010. V. 195. № 17. P. 5794-5800.
12. The importance of «going nano» for high power battery materials / D. Bresser, E. Paillard, M. Copley, P. Bishop, M. Winter, S. Passerini // *Journal of Power Sources*. 2012. V. 219. P. 217-222.
13. Nanostructuring versus microstructuring in battery electrodes / R. Jain, A.S. Lakhnot, K. Bhimani, S. Sharma, V. Mahajani, R.A. Panchal, M. Kamble, F. Han, C. Wang, N. Koratkar // *Nature Reviews Materials*. 2022. P. 1-11.
14. Synthesis of nickel and nickel hydroxide nanopowders by simplified chemical reduction / J. Tientong, S. Garcia, C.R. Thurber, T.D. Golden // *Journal of Nanotechnology*. 2014. V. 2014.
15. Facile synthesis of novel metal-organic nickel hydroxide nanorods for high performance supercapacitor / J. Xu, C. Yang, Y. Xue, C. Wang, J. Cao, Z. Chen // *Electrochimica Acta*. 2016. V. 211. P. 595-602.
16. Metallic nickel hydroxide nanosheets give superior electrocatalytic oxidation of urea for fuel cells / X. Zhu, X. Dou, J. Dai, X. An, Y. Guo, L. Zhang, S. Tao, J. Zhao, W. Chu, X.C. Zeng, C. Wu, Y. Xie // *Angewandte Chemie International Edition*. 2016. V. 55. № 40. P. 12465-12469.
17. Asymmetric supercapacitor featuring carbon nanotubes and nickel hydroxide grown on carbon fabric: A study of self-discharging characteristics / M.M. Ovhall, N. Kumar, S.K. Hong, H.W. Lee, J.W. Kang // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. V. 828. P. 154447.
18. Nanoscale nickel oxide/nickel heterostructures for active hydrogen evolution electrocatalysis / M. Gong, W. Zhou, M.-C. Tsai, J. Zhou, M. Guan, M.-C. Lin, B. Zhang, Y. Hu, D.-Y. Wang, J. Yang, S.J. Pennycook, B.-J. Hwang, H. Dai // *Nature communications*. 2014. V. 5. № 1. P. 1-6.
19. Synthesis of nickel hydroxide nanoribbons with a new phase: a solution chemistry approach / D. Yang, R. Wang, J. Zhang, Z. Liu // *The Journal of Physical Chemistry B*. 2004. V. 108. № 23. P. 7531-7533.
20. Патент № 2286621 С1 Российская Федерация, МПК H01M 4/32, H01M 10/30. Способ получения гидрата закиси никеля для анодной массы оксидно-никелевого электрода щелочного аккумулятора: № 2005117886/09: заявл. 09.06.2005: опубл. 27.10.2006 / А.В. Лопашев, Н.Е. Семенов, В.В. Волынский [и др.]; заявитель ОАО «Завод автономных источников тока».

21. Ingham B., Toney M.F. X-ray diffraction for characterizing metallic films // *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*. Woodhead Publishing, 2014. P. 3-38.

### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Джармухамбетова Мария Алексеевна** – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Maria A. Dzharmuhambetova** – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Викулова Мария Александровна** – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Maria A. Vikulova** – PhD (Chemistry), Associate Professor, Department of Chemistry and Technology of Materials, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Горшков Николай Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Nikolay V. Gorshkov** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Chemistry and Technology of Materials, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 25.06.2022, принята к опубликованию 30.08.2022*

**Р.Д. Исмонов, И.Н. Ганиев, Х.О. Одиназода,  
А.М. Сафаров, Ф.А. Алиев**

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ИНДИЯ  
НА КОРРОЗИОННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ,  
ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ  
ФУНКЦИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АБ1**

*Аннотация.* В работе представлены результаты исследования влияния добавок индия на коррозионно-электрохимическое поведение, теплоемкость и изменения термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1. Показано, что добавки индия на 0,5 мас.% увеличивают анодную устойчивость исходного сплава в среде электролита NaCl. В режиме «охлаждения» по известной теплоёмкости эталонного образца из меди марки М00 установлена температурная зависимость теплоёмкости алюминиевого сплава АБ1 с индием. Показано, что с ростом температуры теплоёмкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. Установлено увеличение теплоёмкости, энтальпии и энтропии алюминиевого сплава АБ1 от количества индия. При этом величина энергии Гиббса уменьшается.

*Ключевые слова:* алюминиевый сплав АБ1, индий, удельная теплоемкость, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса, эталон (Cu марки М00)

**R.D. Ismonov, I.N. Ganiev, H.O. Odinzoda,  
A.M. Safarov, F.A. Aliev**

**EFFECT OF INDIUM ADDITIVES ON CORROSION RESISTANCE, HEAT  
CAPACITY AND CHANGES IN THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF AB1  
ALUMINUM ALLOY**

*Abstract.* The paper presents the results of research into effect of indium additives on the corrosion-electrochemical behavior of the heat capacity and changes in thermodynamic functions of the AB1 aluminum alloy. It is shown that addition of indium by 0,5 wt.% increases anodic stability of the initial alloy in the NaCl electrolyte medium. In the «cooling» mode, the temperature dependence of the heat capacity of the aluminum alloy AB1 with indium was

*established based on the known heat capacity of the reference sample made of copper grade M00. It is shown that with increasing the temperature, the heat capacity, enthalpy and entropy of the alloys increase, while the value of the Gibbs energy decreases. An increase in the heat capacity, enthalpy and entropy of the aluminum alloy AB1 from the amount of indium has been established. In this case, the value of the Gibbs energy decreases.*

**Keywords:** *aluminium alloy AB1, indium specific heat, enthalpy, entropy, Gibbs energy, standard (Cu brand M00)*

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время к алюминиевым сплавам возрос интерес исследователей в связи с их широким использованием в различных областях промышленности. Однако в общедоступной научной литературе и в сети интернета отсутствуют данные о коррозионной устойчивости и температурной зависимости теплоёмкости сплавов алюминия с элементами подгруппы индия. С другой стороны, имеется мало работ по исследованию теплоёмкости чистых металлов, полученных в режиме «нагрева».

Монотонное изменение в режиме «нагрева» температуры объекта затруднено из-за существования ряда внешних факторов (теплопроводность окружающей среды, напряжение в сети питания печи и пр.), так как данные эксперименты являются многофакторными. Более простым и приемлемым с этой точки зрения считается исследование образцов в режиме «охлаждения» [1].

Целью данной работы является экспериментальное исследование коррозионной устойчивости, температурной зависимости удельной теплоёмкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1 (Al+1%In) с 0,05-0,5 мас.% индием.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Сплавы получали из алюминия марки А7 (ГОСТ 11069-2019), бериллия металлического гранулированного марки БрМ1 (ГОСТ ТУ-112-40) и металлического индия марки ИН-1 (ГОСТ 10297-94). Сплавы содержали индий в пределах 0,01-0,5 мас.%, что предусматривало десяти- и пятидесятикратное увеличение концентрации легирующего компонента в сплаве АБ1, и по структуре соответствовали области твердого раствора индия в сплаве АБ1. Из расплава отливались цилиндрические стрежни диаметром 8 мм и длиной 140 мм. Торцевая часть стержня служил рабочим электродом [2].

Исследования выполнены на импульсном потенциостате ПИ-50-1.1 в среде электролита NaCl в потенциостатическом режиме. Электродом сравнения служил хлоридсеребряный, стандартным – платиновый электрод. Скорость развёртки потенциала составляла 2 мВ/с. Подробная методика электрохимических свойств исследования сплавов приведена в работах [2-4].

На рис. 1 в качестве примера представлена полная поляризационная кривая алюминиевого сплава АБ1 и показана последовательность снятия кривых. При электрохимических исследованиях образцы поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении в исследуемый раствор ( $E_{\text{св.корр.}}$  – потенциал свободной коррозии, или стационарный) до значения потенциала, при котором происходит резкое возрастание тока растворения (рис. 1, кривая I). Далее образцы поляризовали в обратном направлении до потенциала -1,2 В, в результате этого происходило подщелачивание приэлектродного слоя поверхности сплава и удаление оксидного слоя (рис. 1, кривые II и III). Наконец, электрод повторно поляризовали в положительном направлении (рис. 1, кривая IV) и по ним определялись анодные электрохимические потенциалы коррозии сплавов [2].

В табл. 1 обобщены результаты исследования.

Потенциалы коррозии, питтингообразования и репассивации с ростом концентрации индия в сплаве АБ1 смещаются в положительную область. Данная зависимость имеет место во всех исследованных средах 0,03; 0,3 и 3,0 %-го NaCl. Добавки индия повышают анодную устойчивость сплава АБ1 на 20 % в исследованных средах о чём свидетельствует уменьшение плотности тока ( $i_{\text{корр.}}$ , А/м<sup>2</sup>) коррозии сплавов. При увеличении концентрации индия до 0,5 мас.% монотонно снижается скорость коррозии (К, г/м<sup>2</sup>·ч) сплава АБ1.

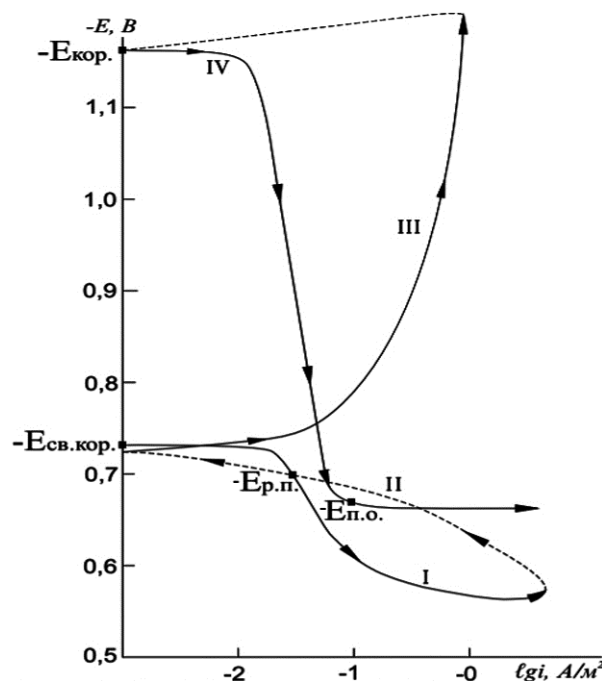


Рис. 1. Полная поляризационная кривая (2 мВ/с<sup>1</sup>) АБ1, в среде электролита 3 %-ного NaCl

Коррозионно-электрохимические характеристики алюминиевого сплава АБ1, в среде электролита NaCl. Скорость развёртки потенциала 2 мВ/с

Среда NaCl, мас. %	Содержание индия в сплаве, мас. %	Электрохимические потенциалы В, (х.с.э.)				Скорость коррозии	
		-E <sub>св.кorr.</sub>	-E <sub>кorr.</sub>	-E <sub>п.о.</sub>	-E <sub>реп.</sub>	i <sub>кorr.</sub> ·10 <sup>2</sup>	K·10 <sup>3</sup>
						А/М <sup>2</sup>	г/М <sup>2</sup> ·ч
0,03	–	0,560	1,090	0,490	0,540	0,031	10,38
	0,01	0,510	0,930	0,440	0,495	0,023	7,70
	0,05	0,500	0,920	0,424	0,490	0,021	7,03
	0,1	0,495	0,910	0,412	0,484	0,019	6,36
	0,5	0,490	0,900	0,400	0,475	0,018	6,03
0,3	–	0,600	1,114	0,560	0,580	0,036	12,06
	0,01	0,570	0,990	0,520	0,560	0,030	10,05
	0,05	0,566	0,940	0,510	0,555	0,029	9,71
	0,1	0,560	0,926	0,500	0,540	0,027	9,04
	0,5	0,556	0,906	0,485	0,540	0,025	8,37
3,0	–	0,728	1,160	0,670	0,700	0,042	14,07
	0,01	0,642	1,100	0,580	0,680	0,038	12,73
	0,05	0,632	0,960	0,565	0,670	0,036	12,06
	0,1	0,626	0,950	0,540	0,660	0,034	11,40
	0,5	0,620	0,940	0,520	0,660	0,033	11,05

Подобное поведение свидетельствует о том, что предельная растворимость индия в сплаве АБ1 может превышать 0,5 мас.%. Обычно при переходе границы растворимости наблюдается скачкообразное изменение физико-химических свойств сплавов, что нами не было замечено при исследовании других алюминиевых сплавов [3, 4].

Таким образом, улучшение коррозионной стойкости сплава АБ1 при легировании индием объясняется его модифицирующим действием на структуру эвтектического алюминиево-бериллиевого сплава АБ1, а также увеличением истинной поверхности анода или же уплотнением защитного фазового слоя окислов малорастворимыми продуктами окисления [1, 2].

Определение удельной теплоемкости сплава и его температурная зависимость играет большую роль в исследованиях твердых тел. В литературе имеются сведения о теплоемкости металлического алюминия различных марок [5, 6].

Для измерения удельной теплоёмкости сплавов в широкой области температур использовался закон охлаждения Ньютона – Рихмана, согласно которому всякое тело, имеющее температуру выше окружающей среды, будет охлаждаться, причем скорость охлаждения зависит от величины теплоёмкости тела.

Для определения скорости охлаждения строят кривые охлаждения образцов. Кривая охлаждения представляет собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе.



Зная массы исследуемого образца  $m_2$  и эталона  $m_1$ , скорости их охлаждения  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$  и  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1$  удельную теплоемкость  $C_{p1}$ , можно вычислить удельную теплоемкость  $C_{p2}$  исследуемого сплава из уравнения:

$$C_{p2}^0 = C_{p1}^0 \frac{m_1 \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}{m_2 \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}, \quad (1)$$

Правомочность использования уравнения (1) для расчета теплоемкости представлена в работах [7, 8].

Подробная методика исследования теплоемкости сплавов и схема установки описана в работах [9-12].

Полученные в ходе эксперимента кривые зависимости температуры от времени охлаждения образцов из алюминиевого сплава АБ1 с индием и эталона представлены на рис. 2а и описываются уравнением вида

$$T = T_0 + \frac{1}{2} \left[ (T_1 - T_0) e^{-\tau/\tau_1} + (T_2 - T_0) e^{-\tau/\tau_2} \right]. \quad (2)$$

Дифференцируя (2) по  $\tau$ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{2} \frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{2} \left[ - \left( \frac{T_1 - T_0}{\tau_1} \right) e^{-\tau/\tau_1} - \left( \frac{T_2 - T_0}{\tau_2} \right) e^{-\tau/\tau_2} \right]. \quad (3)$$

По уравнению (3) нами рассчитаны скорости охлаждения образцов из алюминиевого сплава АБ1 с индием, которые графически представлены на рис. 2б.

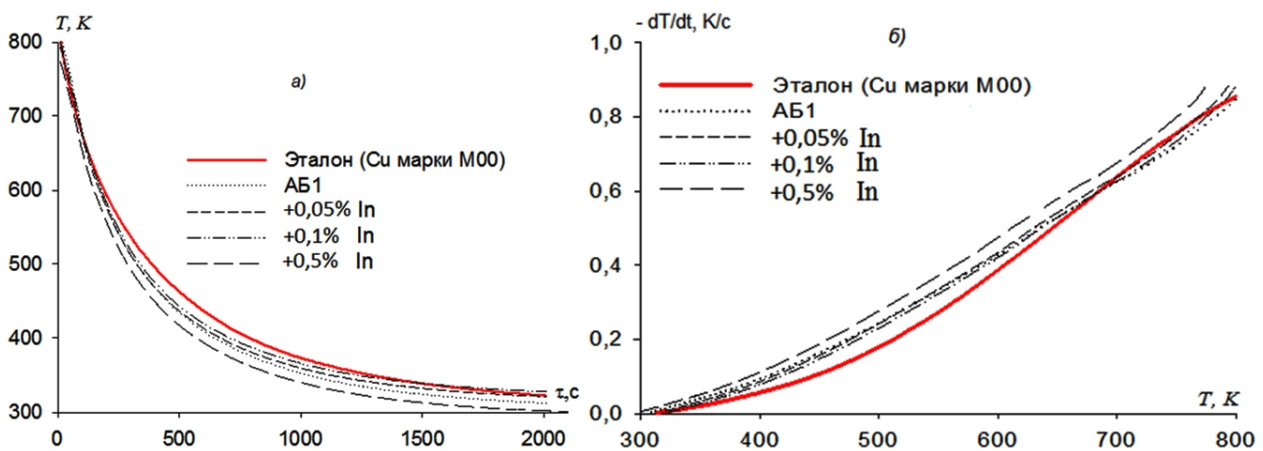


Рис. 2. График зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорости охлаждения от температуры (б) для образцов из алюминиевого сплава АБ1 с индием

Далее по рассчитанным значениям величин скоростей охлаждения образцов из исследуемых сплавов и эталона (Cu марки М00) по уравнению (1) была вычислена их удельная теплоёмкость. При этом использовалась программа Sigma Plot.

Результаты расчёта через 100 К представлены в таблице 2. Как видно с ростом температуры и содержания индия в исходном сплаве теплоемкость сплавов увеличивается.

Таблица 2

Температурная зависимость удельной теплоёмкости (кДж/(кг·К))  
алюминиевого сплава АБ1 с индием и эталона (Cu марки М00)

Содержание индия в сплаве, мас. %	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
0,0	0,7537	0,8686	0,9716	1,0546	1,1101	1,1302
0,05	0,8911	0,9648	1,0393	1,1020	1,1403	1,1416
0,1	0,9066	0,9818	1,0581	1,1226	1,1624	1,1647
0,5	0,9348	1,0124	1,0910	1,1572	1,1976	1,1991
Эталон	0,3850	0,3977	0,4080	0,4169	0,4251	0,4336

Температурная зависимость теплоемкости сплавов описывается общим уравнением:

$$C^0_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (4)$$

Коэффициенты уравнения (4) представлены в табл. 3.

Таблица 3

. Значения коэффициентов  $a, b, c, d$  в уравнении (4)  
для алюминиевого сплава АБ1 с индием и эталона (Cu марки М00).

Содержание индия в сплаве, мас. %	$a,$ Дж / (кг·К)	$b \cdot 10^{-4},$ Дж / (кг·К <sup>2</sup> )	$c \cdot 10^{-6},$ Дж / (кг·К <sup>3</sup> )	$d \cdot 10^{-9},$ Дж / (кг·К <sup>4</sup> )	Коэффициент корреляции $R^2$
0,0	0,3575	21,8	-1,93	60,7	
0,05	0,8626	-3,47	2,81	-2,25	
0,1	0,8808	-3,91	2,91	-2,29	
0,5	0,8778	-2,46	2,75	-2,31	
Эталон	0,324	2,75	-28,7	14,2	

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по (5)-(7) были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (4).

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (5)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b + \frac{b}{2}(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (6)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (7)$$

где  $T_0 = 298,15$  К.

Результаты расчета температурных зависимостей изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса представлены на рис. 3.

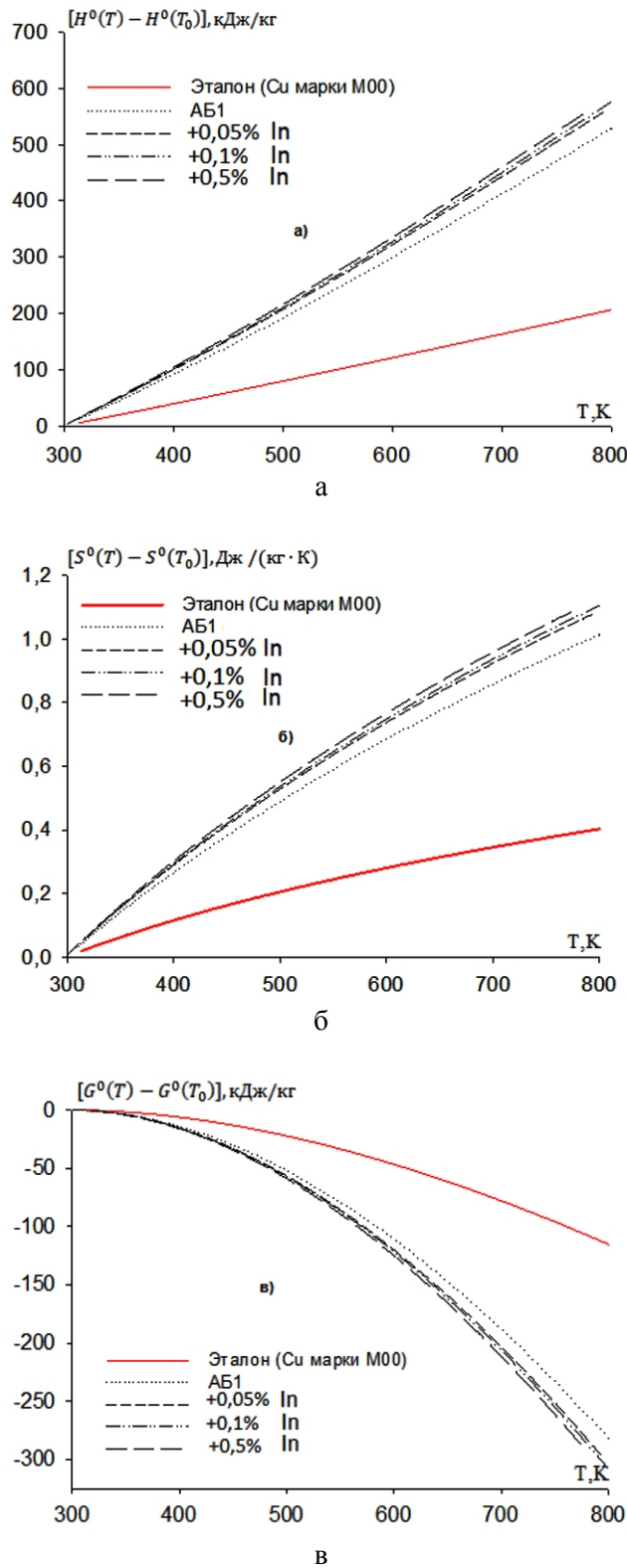


Рис. 3. Температурная зависимость изменений энтальпии (а), энтропии (б) и энергии Гиббса (в) алюминиевого сплава АБ1 с индием и эталона (Cu марки М00)

## ВЫВОДЫ

1. Потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развёртки потенциала 2 мВ/с исследовано анодное поведение алюминиево-бериллиевого сплава АБ1, легированного индием, в среде электролита NaCl различной концентрации.

2. Показано, что легирование сплава АБ1 индием повышает его коррозионную устойчивость на 20 %. Рост коррозионной стойкости сплава АБ1 сопровождается смещением в более положительную область потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации сплавов в среде электролита NaCl. При этом с увеличением добавок индия в сплаве АБ1 отмечена рост указанных потенциалов в положительном направлении оси ординат независимо от концентрации электролита NaCl.

3. Показано, что с ростом концентрации хлорид-иона в электролите наблюдается уменьшение скорости коррозии сплавов, что сопровождается смещением электрохимических потенциалов в отрицательную область.

4. В режиме «охлаждения» по известной теплоёмкости эталонного образца из меди марки М00 установлена теплоёмкость алюминиевого сплава АБ1 с индием. Показано, что с ростом температуры теплоёмкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшаются.

5. Установлена зависимость увеличения теплоёмкости, энтальпии и энтропии сплава АБ1 от количества индия. При этом значение энергии Гиббса уменьшается.

6. Рост коррозионной устойчивости исходного алюминиевого сплава АБ1 при его легировании индием на 20 % позволяет на столько же увеличить продолжительность срока службы изготавливаемых из них деталей.

7. Установленные значения величин теплоемкости и термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1 с индием пополняют страницы соответствующих справочников.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Одинаев Х.О. Физикохимия сплава АМг2 с редкоземельными металлами. Таджикский технический университет им. М.С. Осими, 2016. 153 с.

2. О коррозионном потенциале сплава АБ1, легированного индием, в среде электролита NaCl / Р.Д. Исмонов, И.Н. Ганиев, Х.О. Одиназода, А.М. Сафаров // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования ТТУ. 2017. № 3 (39). С. 17-23.
3. Коррозионно-электрохимические и физико-химические свойства сплава Al+2,18%Fe, легированного индием / З.Р. Обидов, И.Н. Ганиев, Б.Б. Эшов, И.Т. Амонов // Журнал прикладной химии. 2010. № 2. Т. 83. С. 264-267.
4. Потенциодинамическое исследование сплава Al+6%Li с иттрием, в среде электролита NaCl / Ш.А. Назаров, И.Н. Ганиев, М.Т. Норова, Н.И. Ганиева, I. Calliari // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 2. С. 95-100.
5. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Москва: Металлургия, 1989. 384 с.
6. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение) Справочник / под общ. ред. И.Н. Фридляндера. Киев: Коминтех, 2005. 365 с.
7. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения: учеб. пособие / С.А. Киров, А.В. Козлов, А.М. Салецкий, Д.Э. Харабадзе. Москва: ООП Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 23 с.
8. Рогачев Н.М., Гусева С.И. Определение удельной теплоемкости твердых тел: метод. указания к лабор. работе № 1-23. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва, 2012. 17 с.
9. Сафаров А.М., Самиев К.А. Тепловые и теплофизические свойства алюминиево-бериллиевых сплавов с редкоземельными металлами // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических и геологических наук. 2007. № 1. С. 27-35.
10. Исмонов Р.Д. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АБ1 (Al+1%Be), модифицированного галлием // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. ТТУ. 2021. № 3 (53). С. 31-34.
11. Удельная теплоемкость и изменение термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1 (Al+1%Be) / Р.Д. Исмонов, И.Н. Ганиев, Х.О. Одиназода, А.М. Сафаров, Н.Ф. Иброхимов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. ТТУ. 2019. № 1 (45), – С. 90-96.

12. Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Ганиева Н.И. Влияние иттрия на теплофизические свойства сплава АМг2 // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2017. № 2 (67). С. 177-187.

### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Исмонов Рустам Довудович –**

кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Технология машиностроения,  
металлорежущие станки и инструменты»  
Таджикского технического университета  
имени М.С. Осими

**Rustam D. Ismonov –**

PhD (Technical Sciences),  
Associate Professor, Department of Engineer-  
ing Technology, Metal-cutting Machines and  
Tools, Tajik Technical University  
named after M.S. Osimi

**Ганиев Изатулло Наврузович –**

академик НАНТ, доктор химических  
наук, профессор кафедры «Технология  
химического производства»  
Таджикского технического университета  
имени М.С. Осими

**Izatullo N. Ganiev –**

Academician of NAST, Dr.Sci. (Chemistry),  
Professor, Department  
of Chemical Production Technology,  
Tajik Technical University named  
after M.S. Osimi

**Одиназода Хайдар Одина –**

член-корреспондент Национальной  
академии наук Таджикистана, доктор  
технических наук, профессор кафедры  
«Материаловедение, металлургические  
машины и оборудование» Таджикского  
технического университета  
имени М.С. Осими

**Haidar O. Odinizoda –**

Corresponding Member of the National  
Academy of Sciences of Tajikistan,  
Dr.Sci. Tech., Professor,  
Department of Materials Science,  
Metallurgical Machines and Equipment,  
Tajik Technical University named after  
Academician M.S. Osimi

**Сафаров Ахрор Мирзоевич –**

доктор технических наук, профессор,  
Директор института химии  
имени В.И. Никитина  
АН Республики Таджикистан

**Akhror M. Safarov**

Dr.Sci. Tech., Professor,  
Director of the Institute of Chemistry.  
IN AND. Nikitin Academy of Sciences  
of the Republic of Tajikistan

**Алиев Фирдавс Алиевич** –  
кандидат технических наук, доцент,  
декан факультета «Строительство  
и архитектура» Дангаринского  
государственного университета  
Республика Таджикистан

**Firdavs A. Aliev** –  
PhD (Technical Sciences),  
Associate Professor,  
Dean of the Faculty of Construction  
and Architecture of the Dangara  
State University of the Republic of Tajikistan

*Статья поступила в редакцию 25.04.2022, принята к опубликованию 30.08.2022*

**А.Д. Федоров, М.Н. Тимофеев, С.Я. Пичхидзе**

## **К ВОПРОСУ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИТАНИРОВАНИЯ И ЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛИ 45**

***Аннотация.** Рассматриваются вопросы создания упрочняющего покрытия методом плазменного напыления порошка Ti на сталь марки 45 с последующей цементацией в пастах. Исследуются свойства полученного покрытия методом измерения микротвёрдости по ГОСТ 9450-76, а также морфология и структурные особенности поверхности образцов.*

***Ключевые слова:** плазменное напыление, цементация, сталь марки 45, индукционный нагрев*

**A.D. Fedorov, M.N. Timofeev, S.Ya. Pichkhidze**

## **THE ISSUES OF SEQUENTIAL TITANIZING AND CASE HARDENING OF STEEL 45**

***Abstract.** The issues of creation a hardening coating by plasma spraying of Ti powder on steel grade 45 with subsequent carburizing in pastes are considered. The properties of coating obtained by measuring microhardness in line with GOST 9450-76, , as well as morphology and structural features of the surface of the samples are studied.*

***Keywords:** plasma spraying, carburizing, 45 steel, induction heating*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Потеря деталью своего служебного назначения и ее разрушение в большинстве случаев начинается с поверхностного слоя, например, возникновение и развитие усталостной трещины, коррозии, эрозии, износа и др. [1].

Достижения современной науки и техники позволяют решать эти проблемы путем создания материалов с заданными структурой и свойствами за счет новых эффективных способов упрочнения. На сегодняшний день распространенным способом упрочнения



высоконагруженных деталей машин (зубчатые колеса, шестерни и др.) являются: объемная закалка, закалка токами высокой частоты, химико-термическая обработка (цементация, нитроцементация, азотирование) [2].

Объемная закалка – наиболее простой способ получения высокой твердости зубьев. При этом зуб становится твердым по всему объему. Для объемной закалки используют углеродистые и легированные стали со средним содержанием углерода 0,35...0,50 % (стали 45, 40X, 40XH и т. д). Твердость на поверхности зуба составляет 45...55 HRC.

Основные недостатки объемной закалки: коробление зубьев и необходимость последующих отделочных операций; понижение изгибной прочности при ударных нагрузках (материал приобретает хрупкость); ограничение размеров заготовок, которые могут воспринимать объемную закалку. Последнее связано с тем, что для получения необходимой твердости при закалке скорость охлаждения не должна быть ниже критической. С увеличением размеров сечений детали скорость охлаждения падает, и если ее значение будет меньше критической, то получается так называемая мягкая закалка. Мягкая закалка дает пониженную твердость.

Объемную закалку во многих случаях заменяют поверхностными термическими и химико-термическими видами обработки, которые обеспечивают высокую поверхностную твердость (высокую контактную прочность) при сохранении вязкой сердцевины зуба (высокой изгибной прочности при ударных нагрузках) [3].

Химико-термическая обработка (цементация, ХТО) повышает твердость, износостойкость, задиростойкость, кавитационную и коррозионную стойкость и создает на поверхности благоприятные остаточные напряжения сжатия, повышая тем самым усталостную прочность и надежность деталей машин [4].

Наиболее часто для упрочнения деталей машин на машиностроительных предприятиях применяется цементация. При цементации стальное изделие не подвергается значительному термическому воздействию, но при этом твердость его поверхностного слоя значительно увеличивается. Важно, что размеры цементуемых деталей не изменяются. Цементацию применяют в технологии изготовления зубчатых колес небольших размеров, при этом твердость поверхностного слоя должна составлять 658...771 HV (56...60 HRC), а толщина цементованного (поверхностного) слоя – 0,10...0,15 мм от толщины зуба [5-7].

Для цементации применяют низкоуглеродистые стали 3, 10, 20 и легированные стали 20X, 12XH3A, 30XГСА. Они широко применяется при изготовлении шестерни, вала-шестерни, червяка, кулачковых муфт, и других цементируемых деталей, к которым предъявляются требования высокой прочности, пластичности, вязкости сердцевины и высокой поверхностной твердости, работающих под действием ударных нагрузок или при отрицательных температурах [8-9].

Поверхностная закалка токами высокой частоты или пламенем ацетиленовой горелки обеспечивает твердость 48...54 HRC и применима для сравнительно крупных зубьев ( $m > 5$  мм). При малых модулях возможно сквозное прокаливание зуба, что приводит к охрупчиванию и сопровождается короблением зубьев. При относительно тонком поверхностном закаливании профиль зуба искажается менее существенно. Однако без дополнительных отделочных операций трудно обеспечить степень точности выше 8-й. Закалка ТВЧ требует специального оборудования и строгого соблюдения режимов обработки. Стоимость обработки ТВЧ значительно возрастает с увеличением размеров колес. Наиболее часто поверхностной закалке подвергают зубчатые колеса из стали 40X, 40XH, 45 [10].

Одним из наиболее широко применяемых способов поверхностного упрочнения, основанного на диффузии легирующих элементов в поверхностный слой изделий из насыщающей среды при высоких температурах, является ХТО, цементация с последующей закалкой. Упрочнение методом цементации позволяет получить более стабильные показатели твердости, чем при осуществлении других видов ХТО [11]. При цементации происходит насыщение поверхностного слоя детали углеродом до концентрации 0,8-1,1 % и получение после закалки высокой твердости поверхностного слоя при сохранении пластичной сердцевины [12-14].

**Цель работы:** создание упрочняющего покрытия на образцах из стали марки 45 методами последовательного плазменного напыления порошка титана и цементации, анализ механических свойств полученного покрытия.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- синтез новой обмазки на основе аммонийной соли 2-моноэтаноламина и лимонной кислоты;
- анализ механических свойств плазмонапыленного Ti-покрытия;
- анализ механических свойств цементованного TiC-покрытия;
- исследовалось изменение механических свойств материала при использовании изменяющихся по времени режимов ХТО;
- идентификация элементного состава полученного составного покрытия.

**Пример 1.** Синтез аммонийной соли 2-моноэтаноламина и лимонной кислоты.

Смешение 2-моноэтаноламина СТП ТУ КОМП 2-198-10, лимонной (2-гидроксипропан-1,2,3-трикарбоновая) кислоты ГОСТ 908-04 и дистиллированной воды проводили в мольном соотношении 1:1:1 в литровой колбе при нагревании до температуры 88-98° С. Стабилизацию смеси осуществляли путем ее выдержки в течение не менее 2 часов с последующим удалением воды на ротационном испарителе при подъеме температуры до 97-100° С. После чего полученную вязкую массу аммонийной соли

2-аминоэтанола и лимонной кислоты переносили в отдельную ёмкость. Элементный анализ синтезированной соли и ИК-спектр подтверждают образование соединения  $\text{НОС}(\text{O})\text{СН}_2\text{С}(\text{ОН})\text{С}(\text{O})(\text{ОН})\text{СН}_2\text{С}(\text{O})\text{O}^- \text{H}_3\text{N}^+\text{СН}_2\text{СН}_2\text{ОН}$  (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Элементный анализ синтезированной соли  
 $\text{НОС}(\text{O})\text{СН}_2\text{С}(\text{ОН})\text{С}(\text{O})(\text{ОН})\text{СН}_2\text{С}(\text{O})\text{O}^- \text{H}_3\text{N}^+\text{СН}_2\text{СН}_2\text{ОН}$

Содержание	С	Н	Н
Теоретическое	37,94	5,93	5,53
Найдено	37,8; 37,8; 37,9	5,9; 5,7; 5,8	5,3; 5,5; 5,7

Основные полосы поглощения:  $2953,7\text{ см}^{-1}$  – асимметричные,  $2918,6\text{ см}^{-1}$  – симметричные валентные колебания  $\text{СН}_2$ -групп;  $1704,1$ ,  $1633,0$ ,  $1575,2$  и  $1404,4\text{ см}^{-1}$  – анион сложноэфирной группы –  $\text{С}(\text{O})\text{O}^-$ ,  $3500\text{-}3400\text{ см}^{-1}$  – катион  $-\text{NH}_3^+$  – группы,  $1780,2\text{ см}^{-1}$  – карбонильная группа  $\text{С} = \text{O}$ .

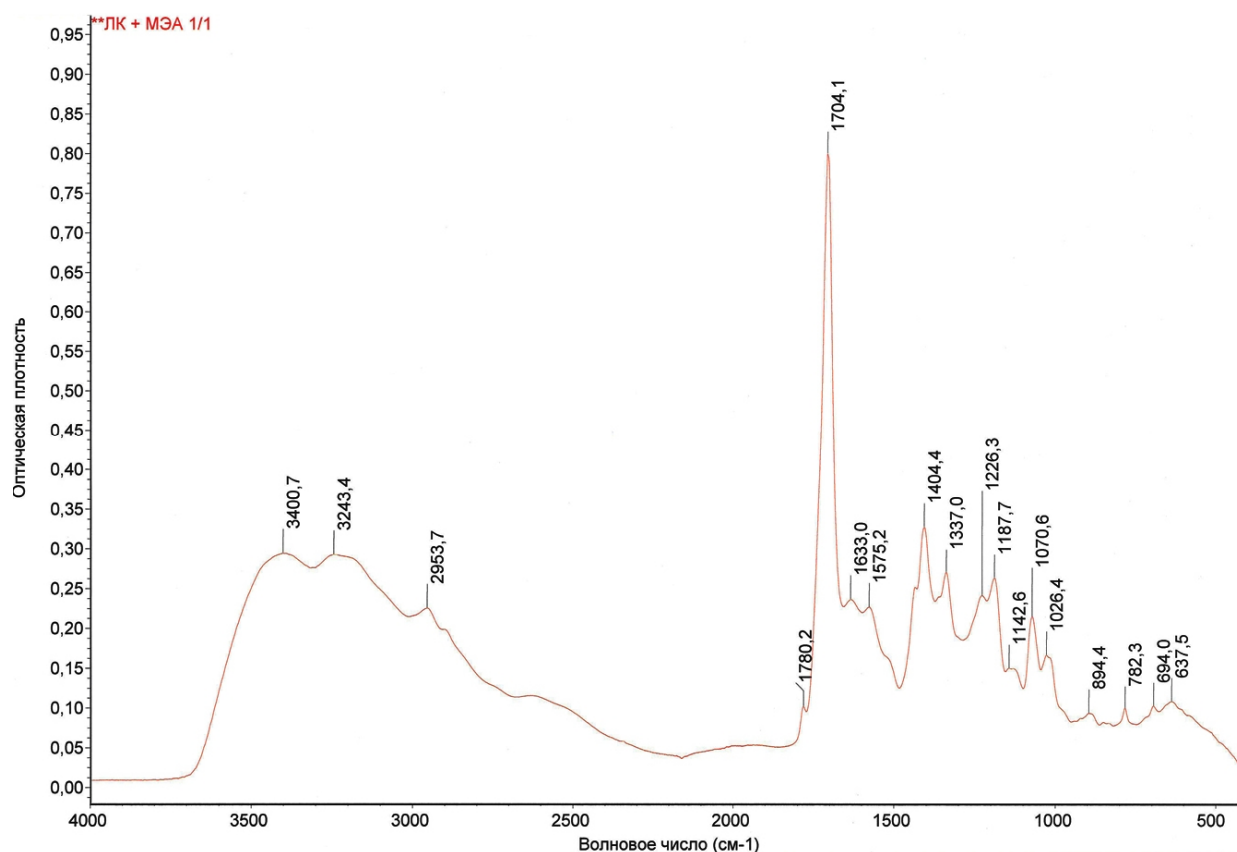


Рис. 1. ИК – спектр синтезированной соли

### Пример 2. Титанирование поверхности стали марки 45.

При проведении исследования были вырезаны пять дисков из стали марки 45 по ГОСТ 1050-88,  $\varnothing$  17 мм, толщиной 3 мм. Диски были подвергнуты пескоструйной обра-

ботке и ультразвуковой чистке, обезжирены этанолом, (рис. 2а) для подготовки к плазменному напылению.

Стальные диски закреплены магнитным прижимом на мишени (рис. 2б), далее на подготовленные образцы нанесено плазменное покрытие, порошком Тi марки ПТС-1 по ГОСТ 19807-91 дисперсностью 40 мкм (рис. 2в) в установке УПН-28, при токе дуги 240А, расстоянии 30 см.

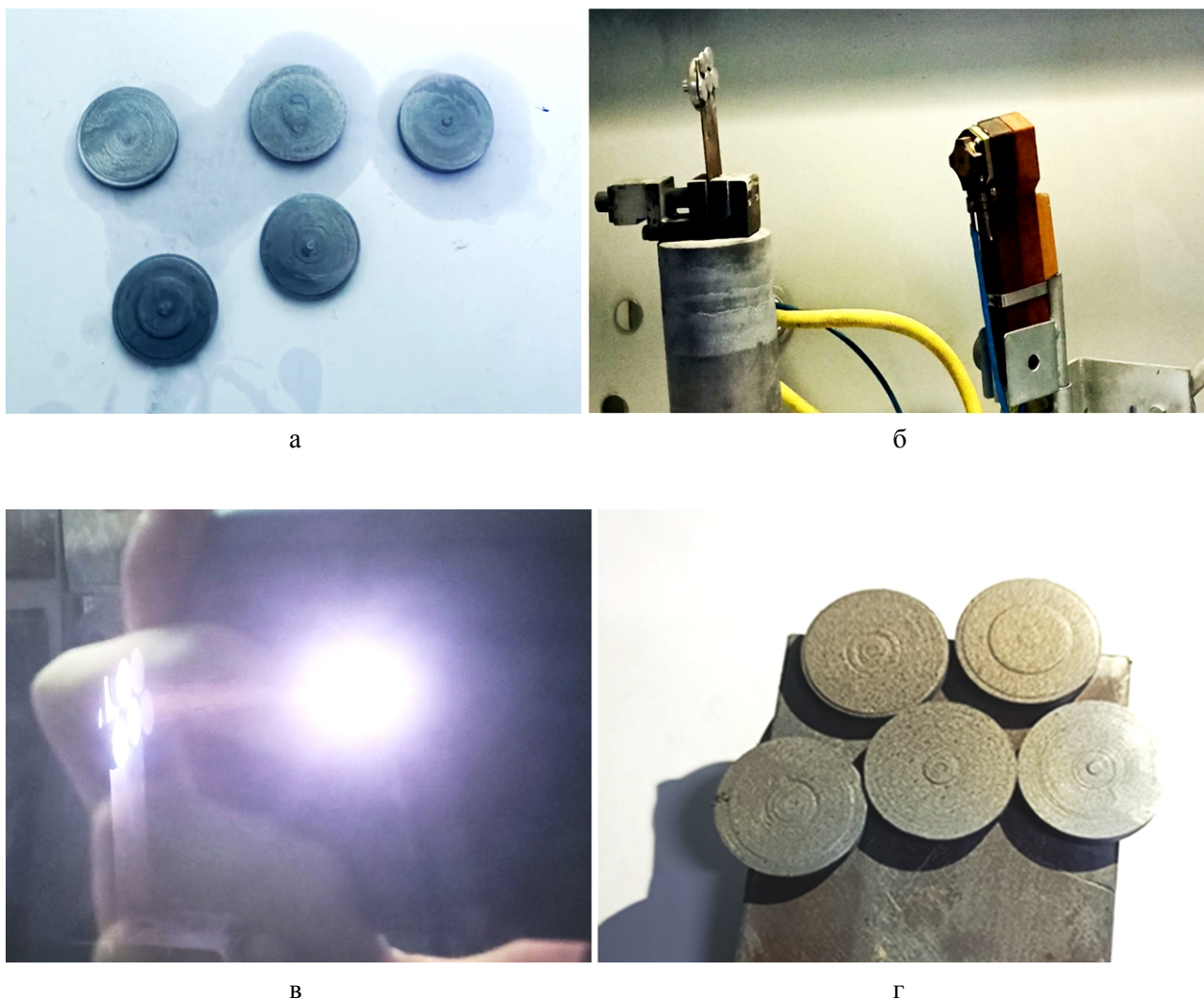


Рис. 2. Этапы нанесения плазменного покрытия порошка титана, где:  
а – образцы из стали марки 45, подготовленные к плазменному напылению;  
б – образцы на магнитном прижиме в УПН-28; в – процесс плазменного напыления;  
г – результат нанесения плазменного покрытия

Как видно из рис. 1г, покрытие лучше всего нанесено на три образца: два из верхнего ряда и один расположенный в середине нижнего ряда. Эти образцы использованы в дальнейшем для исследований.

**Пример 3.** Цементация плазменного плазмонапыленного Ti-покрытия на стали марки 45.

Для последующей цементации приготовлена обмазка, состоящая из смеси 2 г графита и 2 г аммонийной соли 2-моноэтаноламина и лимонной кислоты согласно примеру 1. Обмазка наносилась на образцы после плазменного нанесения Ti – покрытия согласно примера 2. Перед ХТО образцы охлаждены до температуры  $-15^{\circ}\text{C}$ , рис. 3а. ХТО (рис. 3б) проводилась посредством индукционной закалки с предварительным нагревом током 250 А, в индукционной печи ВЧ-15А, тремя циклами, параметры которых представлены в табл. 2.

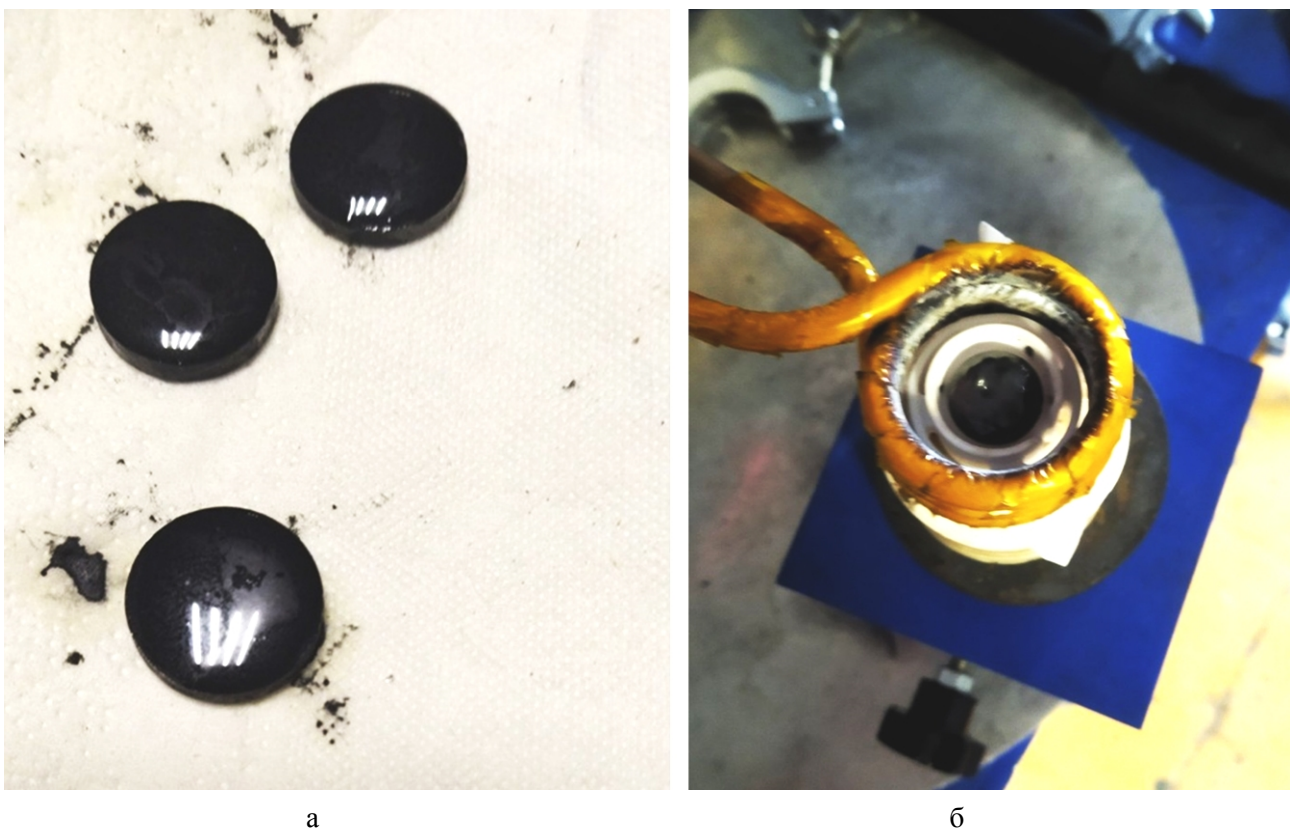


Рис. 3. Цементация образцов, где: а – образцы, подготовленные к науглероживанию, покрытые цементирующей пастой; б – процесс науглероживания в индукционной печи

Таблица 2

Режимы цементации образцов

Номер образца	Сила тока на индукторе, I, А	Температура, T, $^{\circ}\text{C}$	Время выдержки, мин
I	240	1000	5
II	240	1000	4
III	240	1000	3



Извлечённые образцы после ХТО подвергались очистке в ультразвуковой ванне в водном 40 % спиртовом растворе в течение 7 мин. После промывки титановые диски подвергали анализу микротвёрдости поверхности по ГОСТ 9450-76 при помощи микротвердомера ПМТ-3 с грузом массой 100 г. От металлических дисков вырезаны сегменты и залиты эпоксидной смолой для изготовления микрошлифов. Подготовленные микрошлифы обрабатывались абразивной бумагой от меньшего номера к большему. Направление движения выбиралось от напыления вглубь образца для сохранения плазменного покрытия. Для индентирования образцов были выбраны следующие участки: покрытие образца, граница диффузионного слоя, 50 мкм от укола границы, 150 мкм от укола на 50 мкм и середина образца, на каждом участке делалось по 5 уколов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ рис. 4 и 5а показывает, что в результате плазменного напыления и ХТО на шлифах образцов надёжно выделяются следующие три области: покрытие, диффузионный слой и неупрочнённая основа стали. При этом заметна по падению твёрдости граница между напылением и диффузионным слоем, что связано с одновременными процессами диффузии и десорбции, протекающими во время физико-химической обработки. Исследование морфологии и структурных особенностей поверхности образцов (рис. 5б) вторичными и отраженными электронами, а также химического состава (рис. 5в) на растворовом электронном микроскопе «Aspex EXplorer» подтверждает гипотезу о возможности получения упрочнённого слоя TiC и науглероженного железа.

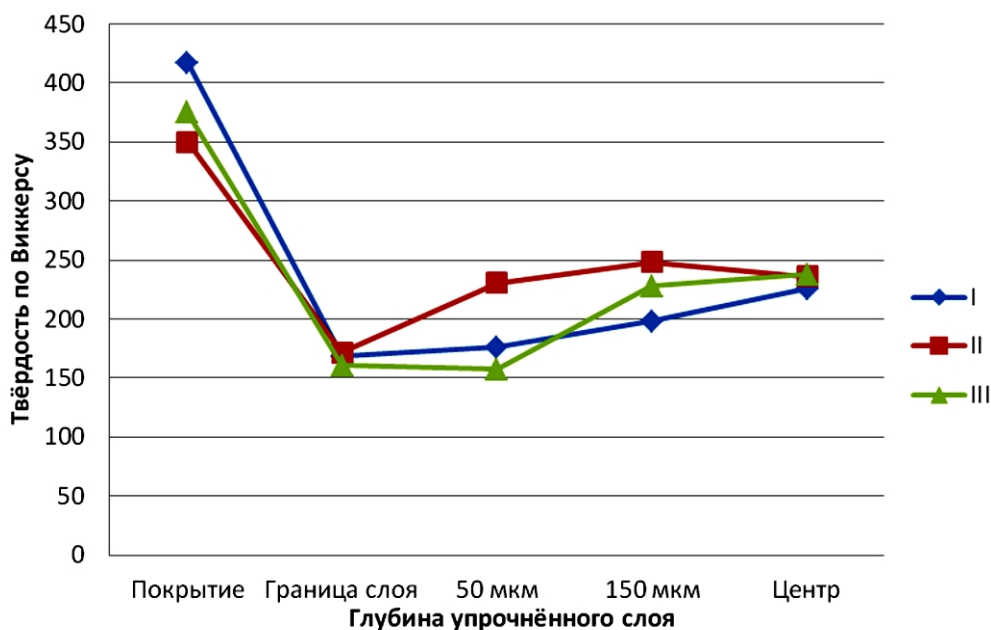
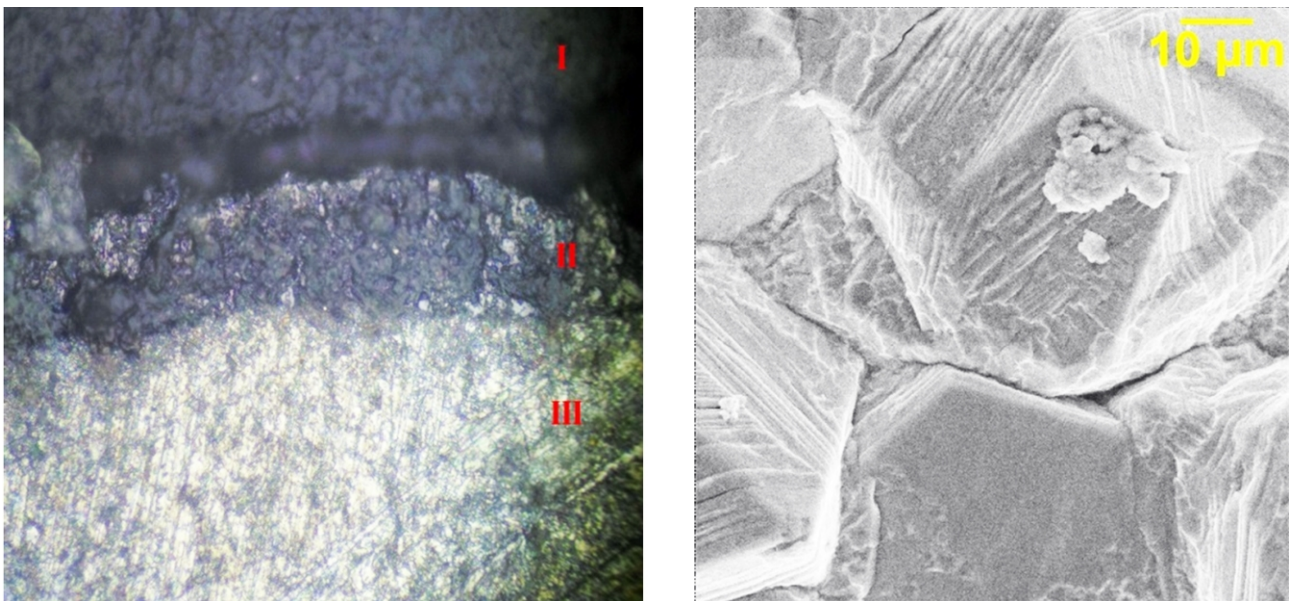
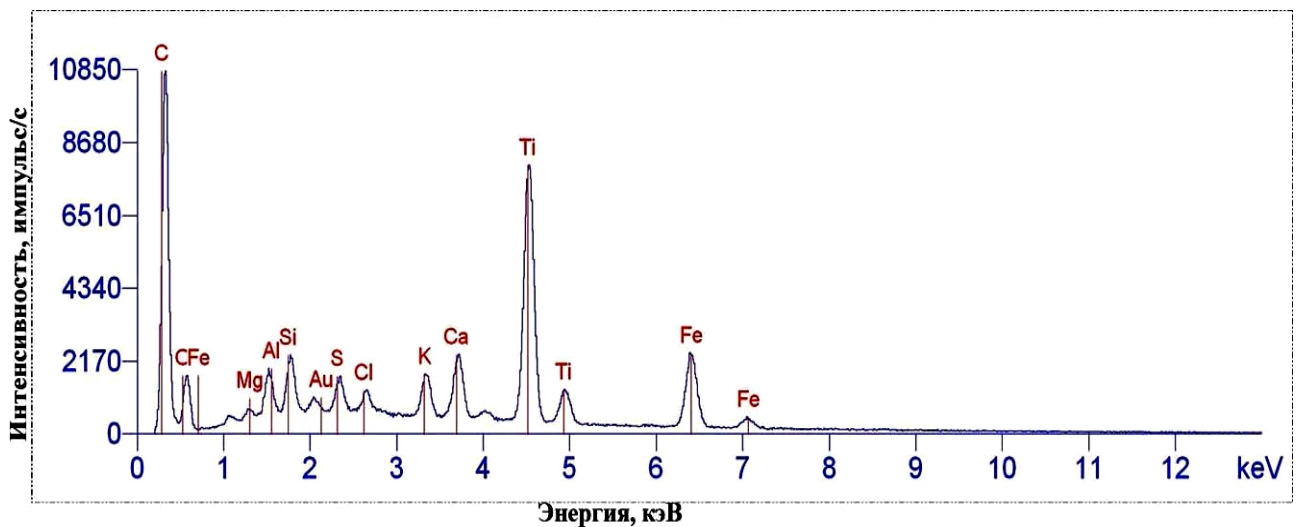


Рис. 4. Графики зависимости микротвёрдости на шлифах от глубины упрочнённого слоя



а

б



в

Рис. 5. РЭМ/ЭДРА, где: а – шлиф при 800×, где: I – эпоксидная смола, II – покрытие, III – диффузионный слой; б – шлиф при 10000×; в – спектр поверхности

Таким образом, разработана технология упрочнения высоконагруженных изделий и тел вращения из стали 45 путём нанесения плазменного покрытия порошка титана и последующей цементации.

Данная технология позволит в дальнейшем получить упрочнённый слой, состоящий из карбида титана TiC и науглероженного железа Fe<sub>3</sub>C, имеющий высокую твёрдость и износостойкость.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Получено упрочняющее покрытие на образцах из стали марки 45 методами последовательного плазменного напыления порошка Ti и цементации. Проведенные испытания микротвёрдости показали образование упрочнённого покрытия и диффузионного слоя. Показано, что твёрдость покрытия увеличилась в 1,5-2 раза в зависимости от режимов цементации. Исследования химического состава позволяют предположить образование упрочнённого слоя из TiC и науглероженного железа, имеющего высокую твёрдость и износостойкость. Разрабатываемая технология позволит получить для высоконагруженных узлов износостойкое покрытие, состоящее из карбида титана TiC.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Собачкин А.В., Ситников А.А., Яковлев В.И. Нанесение различных функциональных покрытий из СВС – механокомпозитов газодетонационным методом // Ползуновский вестник. 2019. Вып. 1. С. 186-191.
2. Магин Д.Ю., Костромин С.В. Исследование структуры и свойств высокопрочной теплостойкой стали после объемной термической обработки и лазерного поверхностного упрочнения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2013. Вып. 4 (101). С. 256-261.
3. Иванов М.Н. Детали машин: учеб. для машиностр. спец. вузов. 4-е изд., перераб. Москва: Высшая школа, 1984. 336 с.
4. Бокштейн С.З. Диффузия в металлах. Москва: Металлургия, 1978. 248 с.
5. Магин Д.Ю., Костромин С.В. Оценка применения технологии лазерного поверхностного упрочнения и объемной термической обработки для повышения эксплуатационных свойств и формирования упрочненного слоя на поверхности детали зубчатое колесо // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы III Междунар. интерактив. науч.-практ. конф. [Екатеринбург, 17-21 декабря 2013 г.] Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. С. 226-228.



6. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов: учеб. пособие для вузов. Москва: Металлургия, 1985. 256 с.
7. Козловский И.С. Химико-термическая обработка шестерен. Москва: Машиностроение, 1970. 232 с.
8. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. Москва: Машиностроение, 1988. 240 с.
9. Кобелева К.В., Туктамышев В.Р. Обзор методов повышения долговечности авиационных зубчатых передач // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. № 50. 11 с. doi: 10.15593/2224-9982/2017.50.12.
10. Татаринов И.В. Механоэлектрохимическая обработка упрочненных зубчатых колес: дис... канд. техн. наук: 05.02.07. Тула, 2010. 134 с.
11. Решетов Д.Н. Детали машин: учеб. для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1989. 496 с.
12. Исследование влияния тока индуктора на структуру и механические свойства газотермических титановых покрытий / Е.О. Осипова, О.А. Маркелова, В.А. Кошуро, А.А. Фомин // Вопросы электротехнологии. 2021. № 3 (32). С. 27-32.
13. Палканов П.А., Кошуро В.А., Фомин А.А. Влияние тока индуктора при азотировании стали Р6М5 на структуру и микротвердость диффузионного слоя // Вопросы электротехнологии. 2021. № 2. С. 5-12.
14. Структура и микротвердость упрочненных слоев, формируемых на титане при лазерной обработке в среде графита / В.А. Кошуро, Е.О. Осипова, М.А. Фомина, А.А. Фомин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2021. № 3 (90). С. 80-87.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Фёдоров Андрей Дмитриевич** – магистрант кафедры «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Andrey D. Fedorov** – Master student, Department of System Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Химические технологии, науки о материалах, металлургия**

---

**Тимофеев Максим Николаевич** –  
ассистент кафедры «Системотехника  
и управление в технических системах»  
Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.,  
сотрудник ФИЦ «Саратовский  
научный центр РАН»

**Maxim N. Timofeev** –  
Assistant Lecturer, Department of System  
Engineering and Control in Technical  
Systems, Yuri Gagarin State Technical Uni-  
versity of Saratov, Staff member at the  
Federal Research Center «Saratov Scientific  
Center of the Russian Academy  
of Sciences»

**Пичхидзе Сергей Яковлевич** –  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Материаловедение  
и биомедицинская инженерия»  
Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.

**Sergey Ya. Pichkhidze** –  
Dr. Sci. Tech., Professor,  
Department of Materials  
Science and Biomedical  
Engineering, Yuri Gagarin  
State Technical  
University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 25.07.2022, принята к опубликованию 12.09.2022*

## Правила оформления и представления статей

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

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

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

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

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

Затем идет текст самой статьи и список источников.

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

8. К статье прилагается экспертное заключение.

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

10. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

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

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

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

14. Плата с аспирантов за публикацию статьи не взимается.

## Вестник Саратовского государственного технического университета

– рецензируемый научно-технический журнал, публикующий статьи по следующим научным направлениям и специальностям:

**2.3** – Информационные технологии и телекоммуникации (05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление)

**2.3.1** (05.13.01) – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки, физико-математические науки)

**2.3.3** (05.13.06) – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

**1.2.2** – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки, технические науки) (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ) (технические науки, физико-математические науки)

**2.5** – Машиностроение (05.02.00 – Машиностроение и машиноведение)

**2.5.5** – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)

**2.5.6** (05.02.08) – Технология машиностроения (технические науки)

**2.5.8** – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)

**2.6** – Химические технологии, науки о материалах, металлургия (05.16.00 – Металлургия и материаловедение)

**2.6.6** – Нанотехнологии и наноматериалы (технические науки, физико-математические науки, химические науки)

**2.6.9** – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии (технические науки, химические науки)

**2.6.11** – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки, химические науки)

Журнал имеет следующие соответствующие указанным группам специальностей разделы содержания:

– **Информационные технологии и телекоммуникации**

– **Машиностроение**

– **Химические технологии, науки о материалах, металлургия**

**Журнал публикует статьи только по данным группам специальностей!**

<b>Регистрационная карта публикующегося в журнале «Вестник СГТУ»</b>		
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		