

ISSN 2073-7408

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

6 (374) 2025

Редколлегия

Главный редактор

Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф.

Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.

Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, проф.

Шоркин В.С. д-р физ.-мат. наук, проф.

Члены редколлегии:

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Дунаев А.В. д-р техн. наук, доц. (Россия)

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

Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Запомель Я. д-р техн. наук, проф. (Чехия)

Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кузичкин О.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Лихачев В.Д. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Лавриненко В.Ю. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Ли Шэнъюань. канд. техн. наук, доц. (Китай)

Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)

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

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

Солдаткин В.М. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Старовойт Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф. (Беларусь)

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

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

Ответственный редактор:

Тюхта А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302030, Орловская обл., г. Орёл, ул.

Московская, 34

+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fippt>

E-mail: radsu@rambler.ru

Зарег. в Федеральной службе по
надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС77-67029
от 30 августа 2016 года

Подписной индекс 29504
по объединенному каталогу
«Прессы России»

на сайтах www.pressa-rf.ru и www.aks.ru
© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2025

Журнал индексируется в системе
Российского индекса научного цитирования
РИНЦ, а также в международных системах
Chemical Abstracts и Google Scholar.

В соответствии с письмом ВАК от 06.12.2022
№02-1198 «О Перечне рецензируемых
научных изданий», журнал
«Фундаментальные и прикладные проблемы
техники и технологий» как издание,
входящее в международную базу данных
Chemical Abstracts, приравнивается к
изданиям категории К1.

Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК по следующим группам научных специальностей:
2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки), 2.2.5. Приборы навигации (технические науки), 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки), 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки), 2.5.2. Машиноведение (технические науки), 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки), 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки), 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки), 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки), 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением (технические науки), 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).

Содержание

Теоретическая механика и ее приложения

Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Ромашин С.Н., Кониццева А.И. Метод определения поврежденности хрупких материалов в отсутствии внешних сил.....	3
Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Ромашин С.Н., Кониццева А.И. Переходный слой в окрестности вершины трещины на границе адгезионного контакта	14

Машиностроительные технологии и оборудование

Низмеев А.А., Дорохов Д.О. К вопросу выбора геометрии инструмента для деформирования осесимметричных изделий.....	22
Панамарев Г.Е., Ляскан А.С., Ефремов А.В. Оценка возможности использования мобильных аддитивных комплексов при ремонте оборудования в полевых условиях	27
Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Заброда С.В., Сафонов Д.П., Крыгина Е.П. Теоретические исследования прочности соединения полимерного компаунд-протектора на абразиве для гидроабразивного резания под водой	37
Титов Н.В., Шманев Н.Д. Влияние пористости покрытия, получаемого методом микродугового оксидирования деталей из алюминиевых сплавов на долговечность твердосмазочных материалов, используемых при его модифицировании	45
Моисеев Д.В., Вожжов А.А., Колесов А.Г. Моделирование циклов внутреннего шлифования для достижения требуемой шероховатости на финишной операции	50
Уразов О.В., Сафонов С.В., Смоленцев В.П. Процесс отработки технологичности научноемких изделий машиностроения	55
Морев П.Г., Капырин К.И., Радченко С.Ю., Голенков В.А., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Особенности пластической деформации в процессе многократной упрочняющей обкатки сплава БРОЦС 5-5-5.....	64

Машиноведение и мехатроника

Нечаев А.А., Поляков Р.Н. Обзор методов обработки изображений для детектирования объектов с помощью искусственных нейронных сетей. Часть 2	75
Злобин С.Н., Корчагин В.О. Моделирование усилителя сцепления колеса с рельсом... Ло Юань Комплекс задач ТУГД теории смазки применительно к подшипникам скольжения приводов мощных ветрогенераторов	85
Грибанов Е.Н., Аналько А.С., Пугачёв А.В., Васильев К.В. Машинное обучение при автоматизации химического анализа при определении красителей в водных системах.....	94
Козырев Д.Л., Чернышев В.И., Поляков Р.Н., Горин А.В. Применение управляемых фрикционных демпферов в транспортных виброзащитных системах.....	106
Бондаренко М.Э., Горин А.В., Яковленко О.В. Концепция экспериментальной установки для оценки коэффициента износа подшипника скольжения.....	113
	119

Приборы, биотехнические системы и технологии

Кузьменко В.П. Моделирование оптимальных параметров спектральных характеристик бытового светоизлучающего диода	125
Эссельбах Р.В., Горельников С.А., Фролов К.Г., Дзюба Д.П. Модернизация привода шагового двигателя телескопа ТПЛ-1М.....	136
Локтионова Ю.И. Факторы космического полета: влияние на организм человека и методы исследования	143
Селихов А.В., Ревякина М.О., Чапча В.А., Меркулов К.А. Валидация канала измерения ЭКГ разработанного портативного кардиодиагностического устройства с использованием критерия Уилкоксона	151

Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Зинченко Т.О. Прототип информационно-измерительной системы для контроля процесса спир-пиролиза и прогнозирования толщины тонких плёнок SNO ₂ :SB.....	159
Воронина О.А., Тугарев А.С., Донцов В.М., Миишин В.В., Плащенков Д.А. Анализ методов контроля монтажа кристаллов в корпус	166

**Материалы международной научно-технической конференции
«Динамика, надежность и долговечность механических
и биомеханических систем»**

Перепадя К.В., Лекарев Г.В., Балашов М.Г., Левчук Н.А. Методика размерного анализа судового рулевого устройства.....	173
Поляков А.М., Бугаев П.А., Колесов М.А. Актуальные методологические основы численно-аналитической механики многозвездных шарнирных механизмов.....	179
Ковалёв Н.И., Лукина Л.И., Солдатова С.В., Моисеев Д.В. Проблема аварийной безопасности на метанопасной шахте «Анжерская южная».....	193
Скатков А.В., Доронина Ю.В., Моисеев Д.В., Цофнас Д.А. Моделирование оценок состояния канала информационного обмена на основе энтропийной модели	199
Неменко А.В., Никитин М.М. Оптимизация восстановления поверхностей гидроцилиндров производственных агрегатов	209

Editorial Committee

Editor-in-chief

Radchenko S.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editor-in-chief Assistants:

Barsukov G.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Polyakov R.N. Doc. Sc. Tech., Prof.

Shorkin V.S. Doc. Sc. Ph. – Math., Prof.

Member of editorial board:

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Dunaev A.V. Doc. Sc. Tech., Assist. Prof. (Russia)

Dyakonov A.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Zapomel Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Czech Republic)

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kuzichkin O.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kukhar V.D. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Lavrynenko V.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Li Shengbo. Cand. Sc. Tech., Assist. Prof. (China)

Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Polyakov R.N. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Savin L.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Smolenzhev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Soldatkin V.M. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Starovoitov A.I. Doc. Sc. Ph. – Math., Prof. (Belarus)

Stepanov Yu.S. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Heifets M.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

Responsible editor:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

Address

302030, Oryol region, Oryol, st.

Moskovskaya, 34

+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fippt>

E-mail: radsu@rambler.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77-67029 from 30.08.2016

Index on the catalogue of the

«Pressa Rossii» 29504

on the websites www.pressa-rf.ru

and www.aks.ru

© Orel State University, 2025

The journal is indexed in the system of the Russian Science Citation Index (RSCI), and also in international systems Chemical Abstracts and Google Scholar.

In accordance with the letter of the Higher Attestation Commission dated December 6, 2022 No. 02-1198 "On the List of Peer-Reviewed Scientific Publications", the journal Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, as a publication included in the international Chemical Abstracts database, is equated to publications of the K1 category.

Contents

Theoretical mechanics and its applications

Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Romashin S.N., Konisheva A.I. Method for determining the damage state of brittle materials in the absence of external forces	3
Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Romashin S.N., Konisheva A.I. Transition layer in the vicinity of a crack tip at the interface of an adhesive contact	14

Machine-building technologies and equipment

Nizmeyev A.A., Dorohov D.O. On the choice of geometry for deforming axis-symmetric products	22
Panamarev G.E., Lyaskin A.S., Efremov A.V. Estimation of additive mobile units capabilities for field repairs	27
Barsukov G.V., Kozhus O.G., Zabroda S.V., Safronov D.P., Krygina E.P. Theoretical study of the bond strength of polymer protector compound to abrasives for underwater waterjet cutting	37
Titov N.V., Shmanev N.D. Influence of porosity of the coating obtained by the method of microarc oxidation of parts from aluminium alloys on the durability of hard-and-smoke materials used in its modification	45
Moiseev D.V., Vozhzhov A.A., Kolesov A.G. Simulation of internal grinding cycles to achieve the required roughness in the finishing operation	50
Urazov O.V., Sajonov S.V., Smolentsev V.P. The process of testing the manufacturability of high-tech engineering products	55
Morrev P.G., Kapyrin K.I., Radchenko S.Yu., Golenkov V.A., Dorohov D.O., Gryadunov I.M. Plastic deformation features of cast alloy 85CU5ZN5SN5PB under multi-pass deep rolling-burnishing working	64

Machine Science and Mechatronics

Nechaev A.A., Polyakov R.N. Review of image processing methods for object detection using artificial neural networks. Part 2	75
Zlobin S.N., Korchagin V.O. Modeling of a rail-wheel clutch booster	85
Luo Yuan Complex of TEHD tasks in lubrication theory applicable to sliding bearings of high-power wind turbine drives	94
Gribanov E.N., Ananko A.S., Pugachev A.V., Vasiliev K.V. Machine learning in the automation of chemical analysis in the determination of dyes in water systems	106
Kozyrev D.L., Chernyshev V.I., Polyakov R.N., Gorin A.V. Application of controlled friction dampers in transport vibration protection systems	113
Bondarenko M.E., Gorin A.V., Yakovlenko O.V. Concept of an experimental setup for estimation of the wear coefficient of a plain bearing	119

Devices, biotechnical systems and technologies

Kuzmenko V.P. Modeling optimal parameters of the spectral characteristics of household light-emitting diodes	125
Eesselbakh R.V., Gorelnikov S.A., Frolkov K.G., Dzyuba D.P. Modernization of the stepper motor drive of the TPL-1M telescope	136
Loktionova Y.I. Space flight factors: impact effects on the human body and research methods	143
Selikhov A.V., Reviyakina M.O., Chapcha V.A., Merkulov K.A. Validation of the ECG measurement channel of the developed portable cardiac diagnostic device using the Wilcoxon criterion	151

Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

Zinchenko T.O. Prototype of an information-measurement system for spray pyrolysis process monitoring and $\text{SNO}_2:\text{SB}$ thin film thickness prediction	159
Voronina O.A., Tugarev A.S., Dontsov V.M., Mishin V.V., Plashchenkov D.A. Analysis of crystal mounting control methods	166

**Materials of the international scientific and technical conference
«Dynamics, reliability and durability of mechanical
and biomechanical systems»**

Perepadya K.V., Lekarev G.V., Balashov M.G., Levchuk N.A. The method of dimensional analysis of the ship's steering device	173
Polyakov A.M., Bugaev P.A., Kolesov M.A. Current methodological bases numerical-analytical mechanics of multi-link hinged mechanisms	179
Kovalev N.I., Lukina L.I., Soldatova S.V., Moiseev D.V. Emergency safety problems at the methane-hazardous Anzherskaya yuzhnaya mine	193
Skatkov A.V., Doronina Yu.V., Moiseev D.V., Tsofnas D.A. Modeling of information exchange channel condition estimates based on the entropy model	199
Nemenko A.V., Nikitin M.M. Renewal optimization of hydraulics cylinder surfaces of technical equipment	209

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

УДК 539.3

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-374-6-3-13

ШОРКИН В.С., ФРОЛЕНКОВА Л.Ю., РОМАШИН С.Н., КОНИЩЕВА А.И.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ В ОТСУТСТВИИ ВНЕШНИХ СИЛ

Аннотация. В работе предложен метод оценки и критерии наличия относительной дефектности упругого материала. Дефекты предполагаются плоскими, на которых сохраняется непрерывность поля перемещений и классических напряжений, но нарушается непрерывность поля градиентов перемещений. Предполагается, что такие дефекты возникают в металлах на межзеренных границах их структуры как при упрочнении, так и при изменении напряженно-деформированного состояния. В основе метода лежит предположение о том, что в этих условиях наличие дефектов снижает потенциальную энергию по сравнению с состоянием в их отсутствии.

Ключевые слова. Упрочнение, дефект, поврежденность, нелокальная и локальная теории упругости, межчастичные потенциальные взаимодействия.

Введение

Нагружение упругого материала, в результате которого он испытывает малые деформации, изменение его механических свойств, например, в результате упрочнения пластическим деформированием [1], может быть причиной зарождения в нем дефектов структуры материала. Из них могут развиваться микротрешины [2 – 4]. Для них характерно наличие несоответствия атомных решеток и напряжений несоответствия [5 – 6]. Общей чертой дефектов до их развития в микротрешины, является сохранение сплошности материала. На этом основании рассматриваемые дефекты считаются плоскими. Прогнозирование вероятности возникновения и распространения таких дефектов, которые могут перерости в микротрешины при больших нагрузках, является актуальной задачей. Ее решению посвящена данная работа. Метод, изложенный в работе построен на использовании градиентной теории линейно упругих материалов, использующей в качестве кинематических характеристик не только первый, но и второй градиенты перемещений. В рамках метода предполагается также, что среда обладает начальным напряженным состоянием.

Модель сплошной среды

Модель сплошной среды представлена в работах [7, 8]. Ее основные черты состоят в следующем. Рассматривается однородное изотропное упругое тело B , ограниченное поверхностью A . Его отсчетной конфигурацией является область Λ , а текущей – область Λ_t . Первая ограничена поверхностью A , а вторая – поверхностью A_t . Переход из отсчетной конфигурации в текущую конфигурацию характеризуется вектором \vec{u} перемещений центров инерции его частиц $dB \subset B$.

$$\vec{u} = \vec{u}(\vec{r}, t) = \vec{R}(\vec{r}, t) - \vec{r}, (\vec{r} \in \Lambda, \vec{R}(\vec{r}, t) \in \Lambda_t, t - \text{время}). \quad (1)$$

Так что перемещение частицы dB относительно частицы dB' характеризуется вектором $\Delta\vec{u} = \vec{u} - \vec{u}'$, а ее положение относительно dB характеризуется вектором $\vec{L} = \vec{M}_t \vec{M}'_t = \vec{R} - \vec{R}' = \vec{l} + \Delta\vec{u}$. Если $L = |\vec{L}| = |\vec{l} + \Delta\vec{u}| \neq |\vec{l}| = l$, то тело B деформируемо.

Рассматриваемые деформации так малы, что

$$|\Delta\vec{u}|/D \ll 1, D^{n-1} \|\nabla^n \vec{u}\| \ll 1. \quad (2)$$

Здесь $\|\nabla^n \vec{u}\|$ – норма тензора $\nabla^n \vec{u}$ – градиента порядка n вектора перемещений; D – характерный размер области, для которой строится модель.

Допущения (2) дают возможность считать относительные изменения объемов частиц при деформации тела B пренебрежимо малыми и проводить описание напряженно-деформированного состояния материала тела B относительно его отсчетной конфигурации Λ .

В рамках нелокальной модели считается, что все частицы dB любого тела B , а также разных тел взаимодействуют между собой на конечных расстояниях посредством потенциальных сил. Потенциальная энергия тела B является суммой не только парных, но и тройных взаимодействий между ними. Причиной учета тройных взаимодействий является необходимость учета разнообразия коэффициента Пуассона для различных материалов.

Потенциалы парных и тройных взаимодействий d^2W и d^3W пропорциональны объемам $dV \equiv d^3\vec{r}$, $dV' \equiv d^3\vec{r}'$, $dV'' \equiv d^3\vec{r}''$ взаимодействующих частиц dB , dB' , dB''

$$d^2W = \Phi^{(2)} dV dV', \quad d^3W = \Phi^{(3)} dV dV' dV''. \quad (3)$$

Коэффициенты пропорциональности зависят только от расстояний между ними.

$$\Phi^{(2)} = \Phi_0^{(2)} \phi(\xi), \quad \Phi^{(3)} = \Phi_0^{(3)} \phi(\xi') \phi(\xi'') \quad (\xi = \beta l). \quad (4)$$

Здесь $\beta > 0$, $\Phi_0^{(2)} = \left| \min \Phi^{(2)} \right| > 0$ и $\Phi_0^{(3)}$ – параметры, а функция $\phi(\xi)$ имеет вид:

$$\phi(\xi) = \begin{cases} \phi_1(\xi), & 0 \leq \xi \leq \xi_0 \\ \phi_2(\xi - \xi_0), & \xi_0 < \xi < +\infty \end{cases}, \quad \xi_0 = \beta l_0 \rightarrow 0. \quad (5)$$

Система частиц dB , dB' , dB'' , образующих тело B , должна быть устойчивой. Поэтому принятые условия, которые обеспечивают выполнение этого требования

$$\phi_1(\xi_0) = \phi_2(\xi_0), \quad \phi_2(\xi - \xi_0) = e^{-2(\xi - \xi_0)} - 2e^{-(\xi - \xi_0)}, \quad (6)$$

$$\int_{\Lambda_0} \phi_1 dV_2 = 2 \left| \int_{\Lambda \setminus \Lambda_0} \phi_2 dV_2 \right|. \quad (7)$$

Здесь Λ_0 – сферическая область радиуса l_0 с центром частицы dB ; монотонная функция $\phi_1(\xi)$ выбирается так, чтобы удовлетворить равенствам (6) и (7).

Выражение для энергии взаимодействия $dW = wdV$ частицы dB со всеми другими частицами тела B в текущей конфигурации в нелокальной модели имеет вид:

$$dW = wdV = \left\{ \int_{\Lambda} \Phi^{(2)}(L') dV_2 + \int_{\Lambda} dV_2 \int_{\Lambda} \Phi^{(3)}(L', L'') dV_3 \right\} dV. \quad (8)$$

Неравенства (2) дают возможность представить вектор $\Delta \vec{u}$ полиномом

$$\Delta \vec{u} \cong (\nabla \vec{u}) \cdot \vec{l} + (1/2)(\nabla^2 \vec{u}) \cdot \vec{l}^2 + \dots + (1/N!)(\nabla^N \vec{u}) \cdot \dots \cdot \vec{l}^N. \quad (9)$$

Здесь принято, что $d\vec{l} = d\vec{r}$, тогда $d/d\vec{l} = \nabla$. Кроме того $\vec{l}^N = \overbrace{\vec{l} \dots \vec{l}}^N$ есть внешние произведения n векторов \vec{l} , а число членов N полинома (9) определяется при решении конкретной задачи. Это помогает получить характерное для локальной модели материалов второго порядка полином второй степени, который определяет вызванный деформацией прирост плотности энергии.

$$\Delta w = \sum_{n=1}^N P^{0(n)} \overbrace{\dots}^N \left(\nabla^n \vec{u} \right)^T + \frac{1}{2} \sum_{m,n=1}^N \left(\nabla^m \vec{u} \right) \overbrace{\dots}^m \left(C^{(n,m)} \overbrace{\dots}^N \left(\nabla^n \vec{u} \right)^T \right). \quad (10)$$

Тензоры напряжений $P^{(n)}$, начальных напряжений $P^{0(n)}$ и тензоры механических свойств материала $C^{(m,n)}$ определяются следующими равенствами.

$$P^{(n)} = \frac{\partial \Delta w}{\partial (\nabla^n \vec{u})} = P^{0(n)} + \sum_{m=1}^N \left(\nabla^m \vec{u} \right) \overbrace{\dots}^m \left(C^{(n,m)} \overbrace{\dots}^N \left(\nabla^n \vec{u} \right)^T \right), \quad (11)$$

$$P^{0(n)} = \int_{\Lambda} \left(\nabla' \Phi^{(2)} \right) \vec{l}'^n dV' + \int_{\Lambda} \left[\int_{\Lambda} \left(\nabla' \Phi^{(3)} \right) \vec{l}'^n dV' \right] dV'' + \int_{\Lambda} \left[\int_{\Lambda} \left(\nabla'' \Phi^{(3)} \right) \vec{l}''^n dV' \right] dV'', \quad (12)$$

$$C^{(n,m)} = \int_{\Lambda} \vec{l}'^n \left(\nabla'^2 \Phi^{(2)} \right) \vec{l}'^m dV' + 2 \int_{\Lambda} \left[\int_{\Lambda} \vec{l}'^n \left(\nabla' \nabla'' \Phi^{(3)} \right) \vec{l}''^m dV' \right] dV''. \quad (13)$$

Здесь $\nabla' \equiv d.../d\vec{l}'$, $\nabla'' \equiv d.../d\vec{l}''$.

В любой момент времени тензоры $P^{(n)}$ подчинены уравнению движения

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \left(P^{(1)} - \nabla \cdot \left(P^{(2)} - \dots - \nabla \cdot \left(P^{(N-1)} - \nabla \cdot P^{(N)} \right) \right) \right). \quad (14)$$

В начальный момент времени $t = 0$ задаются начальные условия распределения перемещений и скоростей:

$$\vec{u}(\vec{r}, t = 0) = \vec{u}_0(\vec{r}), \left[\frac{\partial}{\partial t} \vec{u}(\vec{r}, t) \right]_{t=0} = \vec{v}_0(\vec{r}). \quad (15)$$

В любой момент времени на поверхности A каждой рассматриваемой части или всего тела B задаются краевые условия:

$$\vec{n} \cdot \left[P^{(1)} - \nabla \cdot \left(P^{(2)} - \dots \right) \right] - \nabla_A \cdot \left[\vec{n} \cdot \left(P^{(2)} - \dots \right) \right] = \Pi^{(0)} \text{ или } \vec{u} = \vec{u}_A, \quad (16)$$

$$(\vec{n} \vec{n}) \cdot \left[P^{(2)} - \nabla \cdot \left(P^{(3)} - \dots \right) \right] - \nabla_A \cdot \left[\vec{n} \cdot \left(P^{(3)} - \dots \right) \right] = \Pi^{(1)} \text{ или } \nabla_n \vec{u} = \Gamma_A, \quad (17)$$

и так далее.

Здесь \vec{n} – внешняя единичная нормаль к поверхности A ; $\Pi^{(0)}$ – классические поверхностные силы; $\Pi^{(m)}$, $m = 1, 2, \dots$ – тензоры, характеризующие неклассические поверхностные воздействия, способные совершать работу на тензорных характеристиках неравномерности распределения: $\nabla_n \vec{u} = \Gamma_A = \vec{n} \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{n}} = \frac{\partial}{\partial n}$ и т.д. – производная вдоль нормали к A ; $\frac{\partial}{\partial \vec{n}} = \nabla_{\vec{n}}$ – градиент в направлении нормали \vec{n} ; ∇_A – поверхностный градиент, $\nabla_A + \nabla_{\vec{n}} = \nabla$.

Показано [8], что с помощью (11) – (13) параметры β , $\Phi_0^{(2)}$, $\Phi_0^{(3)}$ можно выразить через параметры Ламе λ , μ и характеристику нелинейности дисперсионного закона высокочастотных акустических волн – например, кривизну κ зависимости $\omega^2 = f(K^2)$ при $K = 0$, где K – волновое число плоской акустической волны частоты ω .

Постановка задачи

В рамках изложенной модели задача об определении распределения дефектности формулируется следующим образом. Предполагается, что исследуемое тело B находится в равновесии. Внешние воздействия на него отсутствуют. Значения параметров β , $\Phi_0^{(2)}$ и $\Phi_0^{(3)}$, а также плотности материала ρ и температуры T известны и распределены по его объему равномерно. Далее тело B подверглось упрочнению, в результате которого параметры межчастичных потенциалов приобрели значения β^* , $\Phi_0^{*(2)}$, $\Phi_0^{*(3)}$, $\rho^* = \rho$, $T^* = T$. Эти изменения привели к изменению механических свойств материала и изменению его напряженно-деформированного состояния (НДС). Возможна и другая ситуация, когда НДС меняется из-за действия внешних нагрузок без изменения механических свойств материала. В обоих случаях возможно возникновение дефектов структуры материала. О таких дефектах в данной работе используется следующее представление.

Рассматриваемые дефекты (учитывая их природу – несоответствия атомных решеток и напряжений несоответствия) являются плоскими. Их сеть образует ячеистую структуру. Так что тело B можно представить в виде объединения ячеек – частиц ΔB , в каждой из которых находится по одному дефекту. При этом под дефектом на атомарном уровне понимается участок ΔA^x плоского сечения ΔA частицы ΔB , вдоль которого нарушена когерентность атомной структуры. На континуальном уровне, в рамках изложенной выше модели упругой среды, это тот же участок ΔA^x плоского сечения ΔA , при пересечении которого сохраняется

непрерывность вектора перемещений и классических напряжений. В то же время здесь терпит разрыв поле градиентов перемещений, а совершающие работу на их вариациях неклассические напряжения обращаются в ноль. Площадь дефекта равна ΔS^χ . Площадь сечения ΔA равна ΔS . Предполагается, что возникновение такой ситуации характерно для межзеренных границ при изменении зернистой структуры материала при его упрочнении.

Частицы ΔB репрезентативны. Ее размеры не могут быть меньше определенной величины, при которой репрезентативность обеспечена с заданной точностью. Поэтому в рамках континуальной механики она считается бесконечно малой: $\Delta B \approx dB$. То же самое относится и к величинам ΔS , ΔS^χ и $\Delta S^\alpha = \Delta S - \Delta S^\chi$ – площадь бездефектной части сечения ΔA . С учетом сказанного, дефектностью частицы ΔB предлагается считать величину

$$\chi = \frac{d S^\chi}{d S}. \quad (18)$$

Задача состоит в расчете этой величины и пространственной ориентации участка ΔA^χ , которая характеризуется единичным вектором нормали \vec{n}^χ к плоскости дефекта.

Решение задачи

В основе решения лежит утверждение о том, что появление дефекта в ячейке из-за развития НДС является энергетически более выгодным, чем его отсутствие при тех же условиях. Для решения задачи вводятся дополнительные к ранее введенным допущения. Дефекты распределены так редко, что интерференции вызванных соседними дефектами изменений полей перемещений, их градиентов, тензоров напряжений не происходит. Возникновение дефекта вызывает изменение НДС только во внутренней части частицы $\Delta B \approx dB$. Характеристики возмущенного каждым дефектом НДС по мере удаления от него стремятся совпасть с характеристиками невозмущенного НДС, которым считается состояние бездефектного материала в тех же условиях. Предполагается, что бездефектное НДС в любой частице $\Delta B \approx dB$, является однородным. Предполагается, что нормаль к дефекту \vec{n}^χ направлена вдоль главного направления тензора напряжений $P^{(1)} \equiv P^{\alpha(1)}$, соответствующего наибольшему из нормальных напряжений [9], развивающихся до появления дефектов. Таким образом, после расчета НДС бездефектного состояния для определения тензорного параметра поврежденности остается необходимым определение его скалярной характеристики χ .

В рассмотрение вводится сплошная эффективная среда, моделирующая дефектную среду. Считается, что ее репрезентативные частицы совпадают с репрезентативными частицами исходной среды – континуума (допускается, что рассматриваемые дефекты сплошности малы по сравнению с частицей ΔB и поэтому их наличие не влияет на размер репрезентативной частицы). Данное допущение означает, что в континууме, который моделирует реальную среду (независимо от наличия дефекта) частица ΔB считается бесконечно малой: $\Delta B \approx dB$. Ее кинематические характеристики – вектор ее перемещения и его градиенты разных порядков, внутри нее считаются постоянными, равными их значениям в центре инерции частицы $\Delta B \approx dB$.

Кроме сказанного внимание обращается на то, что сечение ΔA делит частицу ΔB на две взаимодействующие между собой части $\Delta B_{(1)}$ и $\Delta B_{(2)}$. Так что сечение ΔA становится поверхностью $\Delta A_{(12)}$, вдоль которой эти части взаимодействуют: $\Delta A \equiv \Delta A_{(12)}$. Из-за наличия дефекта описанного выше типа (сохраняется сплошность поля перемещений и классических напряжений) взаимодействие на разных участках поверхности $\Delta A \equiv \Delta A_{(12)}$ происходит по-разному. Вдоль части $\Delta A^\chi \subset \Delta A_{(12)}$ сопрягаются поля перемещений и классических напряжений. Вдоль части $\Delta A^\alpha \subset \Delta A_{(12)}$ сопрягаются поля не только перемещений и их градиентов, используемых моделью среды, но и работающие на их вариациях напряжения.

Учитывая, что нормаль к дефекту \vec{n}^χ направлена вдоль главного направления тензора напряжений $P^{(1)} \equiv P^{\alpha(1)}$, соответствующего наибольшему из нормальных напряжений, а сечение ΔA расположено в плоскости пары других главных напряжений, а также изотропию материала тела B , можно утверждать, что деформации материала, при образовании дефекта будут происходить симметрично относительно плоскости $\Delta A = \Delta A_{(12)}$ в направлении главных осей тензора $P^{(1)} \equiv P^{\alpha(1)}$. Допускается также, что скачкообразный переход от условий сопряжения полей напряжений и деформаций в области $\Delta A^\alpha \subset \Delta A_{(12)}$ к условиям в области $\Delta A^\chi \subset \Delta A_{(12)}$ (в силу взглядов модели трещины Баренблатта [10]) происходит без возбуждения добавки $\vec{u}^\chi(\vec{r})$, вызванной дефектом, к полю перемещений $\vec{u}^\alpha = \vec{u}^\alpha(\vec{r})$ в бездефектной среде вне области $\Delta A^\chi \subset \Delta A_{(12)}$.

На основании сказанного, предполагается, что в каждой из частиц $\Delta B_{(1)}$ и $\Delta B_{(2)}$ существует перпендикулярная дефекту цилиндрическая область (соответственно $\Delta B_{(1)}^\chi$ и $\Delta B_{(2)}^\chi$), направляющей линией которой является его граница. Одной из ее границ является дефект, а другой – граница частицы ΔB . В областях $\Delta B_{(1)}^\chi$ и $\Delta B_{(2)}^\chi$ поле перемещений $\vec{u}^\alpha = \vec{u}^\alpha(\vec{r})$ возмущено добавкой $\vec{u}^\chi(\vec{r})$, вызванной появлением дефекта. Здесь

$$\vec{u}^\chi(\vec{r}) = \vec{u}^\alpha(\vec{r}) + \vec{u}^\chi(\vec{r}). \quad (19)$$

Выражения, аналогичные (19), можно записать и для $\nabla^n \vec{u}$, $P^{(n)}$. В областях $\Delta B_{(1)}^\alpha$ и $\Delta B_{(2)}^\alpha$ этого возмущения нет. В результате оказывается, что перемещения, их градиенты и напряжения распределены по частицам $\Delta B_{(1)}$ и $\Delta B_{(2)}$ следующим образом.

$$(\vec{u}^\alpha, \nabla^n \vec{u}^\alpha, P^{\alpha(n)}) \begin{cases} \neq 0, \vec{r} \in \Delta A^\alpha \\ = 0, \vec{r} \notin \Delta A^\alpha \end{cases}, \quad (\vec{u}^\chi, \nabla^n \vec{u}^\chi, P^{\chi(n)}) \begin{cases} \neq 0, \vec{r} \in \Delta A^\chi \\ = 0, \vec{r} \notin \Delta A^\chi \end{cases}. \quad (20)$$

Далее предлагается считать, что поля перемещений в каждой из репрезентативных частиц $\Delta B_{(1)}$ и $\Delta B_{(2)}$ эффективной среды определяются равенством

$$\vec{u}(\vec{r}) = \alpha \vec{u}^\alpha(\vec{r}) + \chi \vec{u}^\chi(\vec{r}) = (1 - \chi) \vec{u}^\alpha(\vec{r}) + \chi \vec{u}^\chi(\vec{r}), \quad (\vec{r} \in \Delta \Lambda_{(1)}) \cup (\vec{r} \in \Delta \Lambda_{(2)}). \quad (21)$$

С учетом (20) аналогичные выражения можно записать для $\nabla^n \vec{u}$, $P^{(n)}$.

$$\nabla^n \vec{u} = \alpha \nabla^n \vec{u}^\alpha + \chi \nabla^n \vec{u}^\chi, \quad P^{(n)} = \alpha P^{\alpha(n)} + \chi P^{\chi(n)}. \quad (22)$$

Эффективная среда считается сплошной. Поэтому для нее справедливы представленные выше уравнения равновесия, краевые условия, а также условия сопряжения на границе контакта $\Delta A_{(12)}$ частиц $\Delta B_{(1)}$ и $\Delta B_{(2)}$. Использование выражений (20)–(22) с учетом определения (11) и сделанных выше допущений о разграничении областей $\Delta \Lambda_{(j)}^\chi$ и $\Delta \Lambda_{(j)}^\alpha$, занимаемых частицами $\Delta B_{(j)}$ ($j = 1, 2$), приводит задачу о поиске поля $\vec{u}(\vec{r})$ к расщеплению на две задачи – о поиске поля $\vec{u}^\chi(\vec{r})$ и поиске поля $\vec{u}^\alpha(\vec{r})$.

Решив эти задачи, можно построить выражение, которое определяет объемную плотность W потенциальной энергии частицы ΔB (она равна удвоенной энергии частицы $\Delta B_{(1)}$).

$$\begin{aligned} W &= (1 - \chi) W_{p\alpha} + \chi W_{p\chi} + (1 - \chi)^2 W_{\alpha\alpha} + 2\chi(1 - \beta) W_{\alpha\chi} + \beta^2 W_{\chi\chi} = \\ &= \chi^2 (W_{\chi\chi} + W_{\alpha\alpha} - 2W_{\alpha\chi}) + \chi [2(W_{\alpha\chi} - W_{\alpha\alpha}) + (W_{p\chi} - W_{p\alpha})] + (W_{\alpha\alpha} + W_{p\alpha}). \end{aligned} \quad (23)$$

Коэффициенты W_{NM} ($N = p, \alpha, \chi; M = \alpha, \chi$) являются работами обобщенных сил – тензоров напряжений, развившихся в состоянии, соответствующем первому индексу, на обобщенных перемещениях, развившихся в состоянии, соответствующем второму индексу. При $N = p$ напряжения являются начальными.

Значение параметра χ определяется на основании необходимого условия экстремума функции $W(\chi)$: $dW/d\chi = 0$. На его основании этого можно получить:

$$\chi = \frac{(W_{p\alpha} - W_{p\chi}) + 2(W_{\alpha\alpha} - W_{\alpha\chi})}{2(W_{\alpha\alpha} - 2W_{\alpha\chi} + W_{\chi\chi})}. \quad (24)$$

Таким образом, допущение о наличии дефекта в репрезентативной частице дало возможность построить выражение, определяющее его величину. Если дефект есть, то его скалярная мера удовлетворяет равенству (24). Это необходимое условие существования дефекта. В зависимости от развивающегося в окрестности точки определения параметра χ может получиться: $\chi > 1$, $\chi \leq 0$, $0 < \chi < 1$, $\chi = 1$. Первые два случая являются свидетельством отсутствия дефектов. Четвертый случай соответствует дефектности всего сечения $\Delta A_{(12)}$. Физически обоснованным, соответствующим допущениям данной работы значением параметра дефектности χ является то, которое удовлетворяет неравенству $0 < \chi < 1$. С учетом определения (18), параметр χ ($0 < \chi < 1$) можно считать также вероятностью обнаружения дефекта на малом сечении $\Delta A_{(12)}$ частицы ΔB .

В соответствии с работой [11] проблема существования новой фазы – дефектной среды, и определения ее параметров (параметр χ) решается путем выбора минимума потенциальной энергии. Он определяется путем сравнения локальных минимумов энергий фаз с измененной и неизмененной структурами (структуры $(^x)$ и $(^a)$ соответственно). Будем полагать, что найденное с помощью выражения (24) значение χ удовлетворяет неравенству $0 < \chi < 1$. Достаточным условием локального минимума функции (23) является неравенство

$$W_{\chi\chi} + W_{\alpha\alpha} - 2W_{\alpha\chi} > 0. \quad (25)$$

Для того, чтобы локальный минимум энергии при найденном с помощью (24) допустимого значения параметра χ действительно существовал, должно выполняться неравенство $\Psi(\chi) < \Psi(0)$, сравнивающее значения энергии репрезентативной частицы с дефектом и при его отсутствии. Его следствием является выражение

$$\chi < \frac{(W_{p\alpha} - W_{p\chi}) + 2(W_{\alpha\alpha} - W_{\alpha\chi})}{W_{\alpha\alpha} + W_{\chi\chi} - 2W_{\alpha\chi}}. \quad (26)$$

Очевидно, что это неравенство выполнится, если выполнится равенство (24). Таким образом, дефект со скалярной мерой $\chi \in (0; 1)$, вычисленной с помощью равенства (24), будет существовать в рассматриваемой репрезентативной частице, если выполняется неравенство (25). Найденное с помощью (24) значение параметра χ дает возможность определить распределение вызванной дефектом добавки $\vec{u}^x(\vec{r})$ и далее – характеристики эффективной среды.

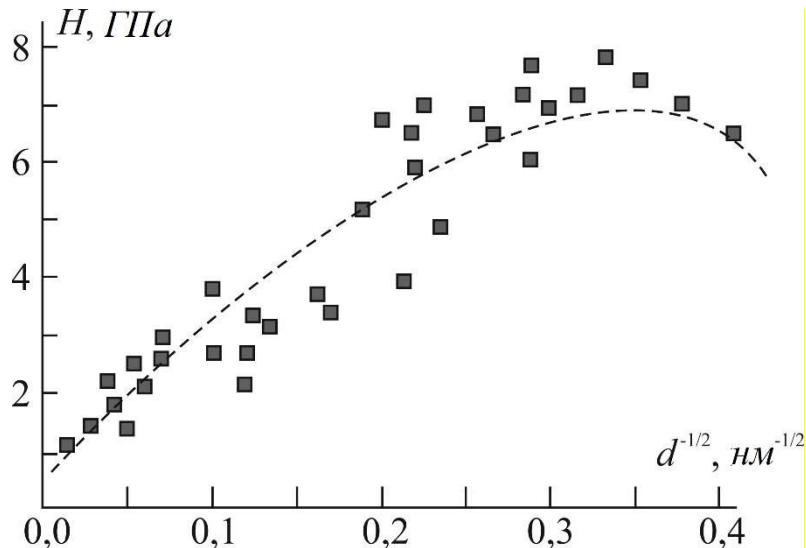
Подтверждение адекватности результатов

Адекватность полученной в работе оценки дефектности показана на примере никеля, имеющего полидисперсную структуру. Подтверждением является качественное совпадение построенных на основе результатов данной работы выводов о характере зависимости поврежденности материала от зернистости, сформировавшейся при его упрочнении, характере связи его твердости после упрочнения с возникшей при этом поврежденностью. Рассмотренные в работе поверхностные (двухмерные) дефекты формируются на границах зерен, образующих упрочненный материал. [12, 13]. Значит, при уменьшении среднего значения d диаметра зерна, когда суммарная площадь межзеренной поверхности в фиксированном объеме материала растет, можно ожидать рост дефектности χ . Вместе с тем показано [14], что при уменьшении значения d сначала растет, а затем, достигнув максимума, начинает уменьшаться твердость материала H . Ввиду сказанного можно ожидать корреляцию обеих зависимостей. Далее предлагается качественное подтверждение этого на примере никеля (рисунки 1 и 2).

Данные рисунка 1 свидетельствуют о возрастающей зависимости $H = H(d^{-1/2})$ на ее начальном участке. При этом, для размеров зерна d , при которых $d^{-1/2} < 0,1 \text{ нм}^{-1/2}$, можно говорить о ее линейности, которая описывается соотношением Холла – Петча [15]

$$H = H_0 + K(d^{-1/2}). \quad (27)$$

Здесь H_0 и K – экспериментально определяемые коэффициенты.



прямоугольники – данные [14], пунктирная линия – их аппроксимация

Рисунок 1 – Изменение твердости в зависимости от размера зерна с обратным квадратным корнем для поликристаллического Ni с размером зерна в нано-, ультрадисперсных и микрокристаллических режимах

Рост дефектности для $d^{-1/2} < 0,1 \text{ нм}^{-1/2}$ можно обосновать, показав, что

$$\frac{d\chi}{dH} > 0. \quad (28)$$

Действительно,

$$\frac{d\chi}{dH} = \left(\frac{d\chi}{dE} \right) / \left(\frac{dH}{dE} \right). \quad (29)$$

Положительность производной dH/dE следует из представленной в работе [16] зависимости

$$H \approx kE/(1-v^2) \approx kE. \quad (30)$$

Здесь k – коэффициент, определяемый экспериментально.

Неравенство $d\chi/dE > 0$ устанавливается на основании анализа зависимости $\chi = \chi(E)$ (график представлен на рисунке 2).

Сама зависимость определяется на основании формулы (24) с учетом зависимостей (12) – (13), в которых значения параметров потенциалов межчастичных взаимодействий вычисляются по формулам [7]

$$\left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) = \frac{E}{294\pi} \frac{2 + 41v}{(1+v)(1-2v)}, \quad (31)$$

$$\left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right) = \frac{27E}{1764\pi^2} \frac{4v-1}{2(1+v)(1-2v)}, \quad (32)$$

$$\beta = \frac{3\sqrt{\pi}}{l_{at}} \sqrt{\frac{15 \left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) + \left(\frac{1563\pi}{4} \right) \left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right)}{2\mu + \lambda}}, \quad 2\mu + \lambda = E \frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}. \quad (33)$$

Здесь $l_{at} = \frac{1}{\sqrt[3]{n}}$, n – число атомов в единице объема, λ и μ – параметры Ламе.

Вычисления проведены для представленных в таблице 1 параметров Ni . В качестве начального значения модуля Юнга принято $E_0 \approx 210 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu \approx 0,28$.

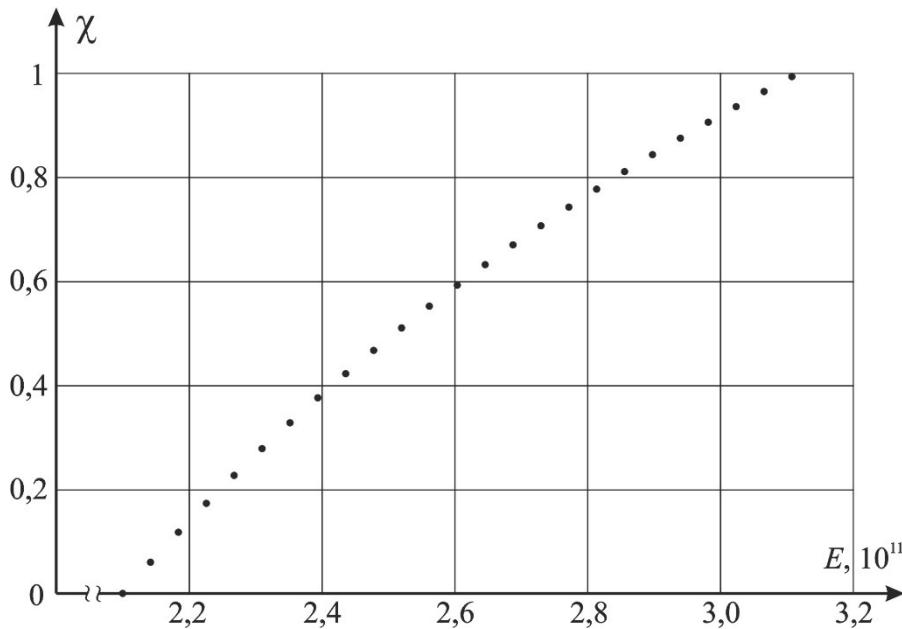


Рисунок 2 – Расчетная зависимость $\chi = \chi(E)$ дефектности от модуля Юнга для никеля

Таблица 1 – Материальные параметры никеля

Материал	$l_{at} \cdot 10^{10} \text{ м}$	$\beta \cdot 10^{-10} \text{ 1/м}$	$\Phi_0^{(2)} \cdot 10^{-40} \text{ Дж/м}^6$	$\Phi_0^{(3)} \cdot 10^{-60} \text{ Дж/м}^9$
Ni	4,5	0,53	0,77	0,0007

Таким образом, для $d^{-(1/2)} < 0,1 \text{ нм}^{-1/2}$ рост твердости материала его зерен сопровождается ростом его дефектности. А так как

$$\frac{d\chi}{d(d^{-(1/2)})} = \left(\frac{d\chi}{dH} \right) \left(\frac{dH}{d(d^{-(1/2)})} \right), \quad (34)$$

то, ввиду роста межзеренной поверхности с уменьшением размера зерна, получается подтверждение того, при уменьшении размера зерна дефектность χ должна расти. Утверждение соответствует результатам работы [6, 15].

Для $d^{-(1/2)} > 0,1 \text{ нм}^{-1/2}$ (как следует из рисунка 1) аппроксимировать зависимость $H = H(d^{-(1/2)})$ линейной функцией нельзя. Здесь аппроксимация является выпуклой вверх функцией, имеющей максимум $H_{max} \approx 7,5 \text{ ГПа}$, после преодоления которого твердость материала падает. Учитывая зависимость (34), свидетельствующую о росте модуля Юнга с ростом твердости материала, о функциях $\chi = \chi(E)$ и $\chi = \chi(d^{-(1/2)})$ можно предполагать такой же выпуклый вид, какой констатирован для $H = H(d^{-(1/2)})$.

Это подтверждается, во-первых, характером кривой на рисунке 2, построенной для производной $d\chi/dE$, во-вторых, следующими рассуждениями. Для предела прочности σ_u известна связь с модулем упругости [17]

$$\sigma_u \approx \frac{E}{500}. \quad (35)$$

Вместе с тем, известно также, что предел прочности, как и твердость, зависит от размера зерна d , эта зависимость в виде $\sigma_u = \sigma_u(d^{-(1/2)})$ имеет такой же вид, как и зависимость $H = H(d^{-(1/2)})$ [15]. Значит, при преодолении предела прочности своего максимума модуль Юнга также его преодолеет. В силу монотонности зависимости $\chi = \chi(E)$ свой максимум преодолеет и дефектность. При этом ее максимальное значение окажется равным $\chi_{\max} = \chi(E_{\max}) \approx 0,7$. Очевидно, что при этом график зависимости $\chi = \chi(d^{-(1/2)})$ будет иметь не только возрастающий, но и выпуклый вид.

Таким образом, проведенные рассуждения, связывая рассмотренный в работе характер дефектности сплошного материала с зернограничной дефектностью, качественно подтверждают адекватность полученных оценок.

Заключение

Данная работа свидетельствует о том, что представленная модель может отразить наблюдаемый в реальных условиях факт того, что изменение свойств материала может привести к возникновению дефектов структуры.

Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-01466-23-07 на 2023 – 2025 гг. от 24.11.2023 г., проект № FSGN-2023-002 (1023082800024-8-1.3.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gryadunov I.M. Hardening Treatment by Plastic Deformation under Conditions of the Integrated Local Loading of a Deformation Zone / I.M. Gryadunov, V.A. Golenkov, O.V. Pilipenko, S.J. Radchenko // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – V. 12. – № 21. – P. 11094 – 11100.
2. Колупаева С.Н. Качественное исследование эволюции дефектной подсистемы гетерогенных сплавов с некогерентной упрочняющей фазой при интенсивных воздействиях / С.Н. Колупаева, Е.В. Ерыгина, Т.А. Ковалевская, Л.Е. Попов // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3. – № 7. – С. 63 – 79.
3. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications / T.L. Anderson. – Boca Raton: CRC Press. – 1991. – 793 с.
4. Козлов Э.В. Эволюция фазового состава, дефектной структуры, внутренних напряжений и перераспределение углерода при отпуске литой конструкционной стали / Э.В. Козлов, Н.А. Попова, О.В. Кабалина, С.И. Климашин, В.Е. Громов; СиБГИУ. – Новокузнецк, 2007. – 177 с.
5. Гринфельд МА. Методы механики сплошных сред в теории фазовых превращений / МА. Гринфельд. – М.: Наука, 1990. – 312 с.
6. Gutkin M.Yu. Defect structures on inner interfaces in nanocrystalline and polycrystalline films / M.Yu. Gutkin, I.A. Ovid'ko // Mater. Phys. Mech. – 2009. – Vol. 8. – № 2. – P. 108 – 148.
7. Presnetsova V.Yu. A variant of describing adhesion interaction in the probe sample system of an atomic-force microscope / V.Yu. Presnetsova, S.N. Romashin, L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin, S.I. Yakushina // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2018. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 299 – 323. DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2018026714
8. Ромашин С.Н. Вариант связи механических и адгезионных свойств твердых материалов / С.Н. Ромашин, В.С. Шоркин // ПММ. – 2020. – Т. 84. – В. 3. – С. 387 – 404. DOI: 10.31857/S0032823520030078
9. Локотощенко А.М. Применение кинетической теории при анализе длительного высокотемпературного разрушения металлов в условиях сложного напряженного состояния (обзор) / А.М. Локотощенко // Прикладная механика и техническая физика. – 2012. – Т. 53. – № 4. – С. 149 – 164.
10. Barenblatt G.I. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture / G.I. Barenblatt // Advances in Applied Mechanics, 1962. – Vol. 7 (7). – P. 55 – 129. Doi:10.1016/S0065-2156(08)70121-2.
11. Vilchevskaya E. On phase transformations of an inclusion in an external strain field / E. Vilchevskaya, A. Freidin // Proceedings Advanced Problems in Mechanics APM 2004, Russian Academy of Sciences, IPME RAS, 2004. – P. 447 – 454.
12. Золоторевский Н.Ю. Фрагментация и текстурообразование при деформации металлических материалов / Н.Ю. Золоторевский, В.В. Рыбин. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 208 с.
13. Perevezentsev V.N. The theory of evolution of the microstructure of superplastic alloys and ceramics / V.N. Perevezentsev // Superplasticity. 60 years after Pearson. Ed. N.Ridley. – Bourne Press, London, U.K., 1995. – P. 51 – 59.

14. Asaro R.J. Mechanistic models for the activation volume and rate sensitivity in metals with nanocrystalline grains and nano-scale twins / R.J. Asaro, S. Suresh // Acta Materialia, 2005. – Vol. 53. – P. 3369 – 3382. Doi: 10.1016/j.actamat.2005.03.047.
15. Малыгин Г.А. Пластичность и прочность микро – и нанокристаллических материалов / Г.А. Малыгин // Физика твердого тела, 2007. – Т. 49. – В. 6. – С. 961 – 982.
16. Фирстов С.А. Теоретическая (предельная) твердость / С.А. Фирстов, Т.Г. Рогуль // Reports of National Academy of Sciences of Ukraine, 2007. – № 4. – С. 110 – 114.
17. Petch N. Metallograficheskie aspekty razrusheniia [metallographic aspects of damage] / N. Petch. Redaktsiia G Libovits Razrushenie. – Moskva: Mir, 1973. 1:376 – 42.

Шоркин Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры технической физики и
математики
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел. +7 (960) 655-00-77
E-mail: v.s.shorkin@yandex.ru

Ромашин Сергей Николаевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры технической физики и математики
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел.: +7 (919) 267-71-26,
E-mail: sromashin@yandex.ru

Фроленкова Лариса Юрьевна

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой
машиностроения,
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел.: + 7 (906) 568-11-18,
E-mail: Larafrolenkova@yandex.ru

Конищева Алёна Игоревна

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел
студент
г. Орёл ул. Московская д. 34
Тел.: + 7(920) 725-03-77
E-mail: konishevaalena123@gmail.com

SHORKIN V.S., FROLENKOVA L.Yu., ROMASHIN S.N., KONISHEVA A.I.

METHOD FOR DETERMINING THE DAMAGE STATE OF BRITTLE MATERIALS IN THE ABSENCE OF EXTERNAL FORCES

Abstract. The paper proposes a method of estimation and a criterion for the presence of relative defectivity of an elastic material. Defects are assumed to be planar, on which the continuity of the displacement field and classical stresses is preserved, but the continuity of the displacement gradient field is broken. It is assumed that such defects arise in metals at the intergrain boundaries of their structure both during hardening and during changes in the stress-strain state. The method is based on the assumption that under these conditions the presence of defects reduces the potential energy compared to the state in their absence.

Keywords: Strengthening, defect, damage, nonlocal and local theories of elasticity, interparticle potential interactions.

BIBLIOGRAPHY

1. Gryadunov I.M. Hardening Treatment by Plastic Deformation under Conditions of the Integrated Local Loading of a Deformation Zone / I.M. Gryadunov, V.A. Golenkov, O.V. Pilipenko, S.J. Radchenko // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – V. 12. – № 21. – R. 11094 – 11100.
2. Kolupaeva S.N. Kachestvennoe issledovanie «volyuci defektnoj podsistemy» heterogennyx splavov snekogerentnoj uprochnyayushhej fazoj pri intensivnyx vozdejstviyax / S.N. Kolupaeva, E.V. Ery'gina, T.A. Kovalevskaya, L.E. Popov // Fizicheskaya mezomehanika. – 2000. – T. 3. – № 7. – S. 63 – 79.
3. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications / T.L. Anderson. – Boca Raton: CRC Press. – 1991. – 793 c.
4. Kozlov E.V. «volyuciya fazovogo sostava, defektnoj struktury», vnutrenix napryazhenij i pereraspredelenie ugleroda pri otpuske litoj konstrukcionoj stali / E.V. Kozlov, N.A. Popova, O.V. Kabalina, S.I. Klimashin, V.E. Gromov; SibGIU. – Novokuzneczk, 2007. – 177 s.
5. Grinfel'd MA. Metody mehaniki sploshnyx sred v teorii fazovyx prevrashhenij / MA. Grinfel'd. – M.: Nauka, 1990. – 312 s.
6. Gutkin M.Yu. Defect structures on inner interfaces in nanocrystalline and polycrystalline films / M.Yu. Gutkin, I.A. Ovid'ko // Mater. Phys. Mech. – 2009. – Vol. 8. – № 2. – R. 108 – 148.
7. Presnetsova V.Yu. A variant of describing adhesion interaction in the probe sample system of an atomic-force microscope / V.Yu. Presnetsova, S.N. Romashin, L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin, S.I. Yakushina // Nanoscience and

Technology: An International Journal. – 2018. – Vol. 9. – Iss. 4. – R. 299 – 323. DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2018026714

8. Romashin S.N. Variant syazi mehanicheskix i adgezionnyx svojstv tverdyx materialov / S.N. Romashin, V.S. Shorkin // PMM. – 2020. – T. 84. – V. 3. – S. 387 – 404. DOI: 10.31857/S0032823520030078

9. Lokotoshhenko A.M. Primenenie kineticheskoy teorii pri analize dilitel'nogo vy'sokotemperaturnogo razrusheniya metallov v usloviyakh slozhnogo napryazhennogo sostoyaniya (obzor) / A.M. Lokotoshhenko // Prikladnaya mehanika i texnicheskaya fizika. – 2012. – T. 53. – № 4. – S. 149 – 164.

10. Barenblatt G.I. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture / G.I. Barenblatt // Advances in Applied Mechanics, 1962. – Vol. 7 (7). – P. 55 – 129. Doi:10.1016/S0065-2156(08)70121-2.

11. Vilchevskaya E. On phase transformations of an inclusion in an external strain field / E. Vilchevskaya, A. Freidin // Proceedings Advanced Problems in Mechanics APM 2004, Russian Academy of Sciences, IPME RAS, 2004. – P. 447 – 454.

12. Zolotorevskij N.Yu. Fragmentaciya i teksturoobrazovanie pri deformacii metallicheskix materialov / N.Yu. Zolotorevskij, V.V. Rybin. – SPb.: Izd-vo Poli-texn. un-ta, 2014. – 208 s.

13. Perevezentsev V.N. The theory of evolution of the microstructure of superplastic alloys and ceramics / V.N. Perevezentsev // Superplasticity. 60 years after Pearson. Ed. N.Ridley. – Bourne Press, London, U.K., 1995. – P. 51 – 59.

14. Asaro R.J. Mechanistic models for the activation volume and rate sensitivity in metals with nanocrystalline grains and nano-scale twins / R.J. Asaro, S. Suresh // Acta Materialia, 2005. – Vol. 53. – P. 3369 – 3382. Doi: 10.1016/j.actamat.2005.03.047.

15. Maly'gin G.A. Plastichnost' i prochnost' mikro – i nanokristallicheskix materialov / G.A. Maly'gin // Fizika tverdogo tela, 2007. – T. 49. – V. 6. – S. 961 – 982.

16. Firstov S.A. Teoreticheskaya (predel'naya) tverdost' / S.A. Firstov, T.G. Rogul' // Reports of National Academy of Sciences of Ukraine, 2007. – № 4. – S. 110 – 114.

17. Petch N. Metallograficheskie aspekty razrusheniya [metallographic aspects of damage] / N. Petch. Redaktsiya G. Libovits Razrushenie. – Moskva: Mir, 1973. 1:376 – 42.

Shorkin Vladimir Sergeevich

Orel State University, Orel
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Technical Physics and
Mathematics
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
Ph.: +7 (960) 655-00-77
E-mail: v.s.shorkin@yandex.ru

Romashin Sergey Nikolaevich

Orel State University, Orel,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate professor of the Department of Technical Physics
and Mathematics
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
Ph.: +7 (919) 267-71-26,
E-mail: sromashin@yandex.ru

Frolenkova Larisa Yuryevna

Orel State University, Orel
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Mechanical Engineering,
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
Ph.: + 7 (906) 568-11-18
E-mail: Larafrolenkova@yandex.ru

Konisheva Alena Igorevna

Orel State University, Orel,
student
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
Ph.: + 7(920) 725-03-77
E-mail: konishevaalena123@gmail.com

ШОРКИН В.С., ФРОЛЕНКОВА Л.Ю., РОМАШИН С.Н., КОНИЩЕВА А.И.

ПЕРЕХОДНЫЙ СЛОЙ В ОКРЕСТНОСТИ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ НА ГРАНИЦЕ АДГЕЗИОННОГО КОНТАКТА

Аннотация. В работе представлено теоретическое описание переходного слоя в окрестности вершины трещины, возникающей на границе адгезионного контакта двух упругих тел из разных материалов вследствие его расслоения под действием внешних или внутренних сил. Показано, что применение нелокальной модели упругого состояния твердого материала дает возможность подтвердить гипотезы Баренблатта о конечности напряжений и деформаций в исследуемой области, что обусловлено существованием нелокальных взаимодействий частиц континуума, дополняющих их контактные взаимодействия. Описание справедливо также и для однородных упругих материалов, в которых по каким-то причинам возникают трещины.

Ключевые слова. Переходный слой, упругий материал, плоская трещина, теория Баренблатта, нелокальная модель.

Введение

Экспериментально установлено, что между твердыми фазами композиционных материалов существует слой материала, свойства которого являются переходными между свойствами этих фаз. В частности, при переходе от одного однородного упругого материала к другому существует слой с переменными механическими свойствами, меняющимися от свойств одного из них к свойствам другого. В настоящее время выходит много работ, посвященных описанию и исследованию свойств этого явления (например, [1, 2]).

На атомно-молекулярном уровне переход значений механических свойств можно объяснить, опираясь на представление о когерентности атомных решеток контактирующих материалов, когда одна решетка продолжает другую без скачкообразных изменений межатомных расстояний [3]. При этом необходим учет поверхностных сил каждого из тел [4]. Атомы поверхностного слоя одного из тел попадают в поле действия поверхностных сил другого тела. В результате возникает нелокальность межатомных взаимодействий поверхностных слоев посредством электрических сил и сил Ван-дер-Ваальса. Чем меньше расстояние подверженных действию поля соседа от поверхности контакта, тем большее влияние это поле оказывает на него.

В слое материала, прилегающем к свободной поверхности, второго тела нет. На атомы слоя действуют атомы слоя между ним и свободной поверхностью – с одной стороны, и атомы всего остального тела – с другой стороны. Неравенство этих сил приводит к деформации атомной решетки и отклонению значений характеристик упругости вблизи свободной поверхности от объемных значений. Оба вида воздействий на атомы поверхностного слоя присутствуют при адгезионном контакте двух тел. Если материалы тел одинаковы, то воздействие атомов собственного материала компенсируется действием атомов второго тела. Если же второго тела нет, то на поверхностные атомы действуют атомы только собственного тела.

Механизм образования переходного слоя можно описать посредством нелокальной модели упругой среды, представленной, например, в работе [5]. В ней предполагается, что действия, характерные для атомов, реализуются элементарными частицами сплошной среды.

Адекватное моделирование переходного слоя особенно важно для ситуации, возникающей в окрестности вершины трещины (рассматривается плоская трещина). Здесь происходит переход от слоя, являющегося объединением соответствующего сплошному адгезионному контакту полубесконечных тел B^α и B^β граничных слоев каждого из них, к пограничным слоям тех же тел, отделенных друг от друга. При этом характер взаимодействия между B^α и B^β меняется. Модель напряженно-деформированного состояния (НДС), построенная на основании классической линейной теории упругости, в этой области перестает быть адекватна реальности, так как допускает возникновение бесконечных напряжений и деформаций. В предлагаемой модели используются утверждения Г.И. Баренблатта [6] о том, что берега трещины действуют друг на друга посредством сил сцепления, уравновешивающих действие растягивающих сил. Они плавно и смыкаются на ее контуре. В данной работе предложено описание изменений свойств пограничного слоя при переходе от поверхности сплошного адгезионного контакта двух тел через вершину трещины к пограничным слоям ее берегов.

1 Модель упругого континуума

Рассматриваются два взаимосвязанных варианта модели упругого континуума – нелокальный и локальный. Континуум представляет собой твердое деформируемое тело B , ограниченное поверхностью A . Тело B – континуум, состоит из материальных тел-точек b . Тело B в отсчетной конфигурации занимает область Λ_0 , а в текущей области Λ . Описывается состояние тела в текущей конфигурации. Оно считается стационарным, а переход к нему изотермическим. Деформации, сопровождающие переход, предполагаются малыми. Так что плотность материала при их развитии и объемы dV частиц $dB \subset B$ не меняются.

1.1 Нелокальная модель

В отсчетной конфигурации тела его материальные точки b имеют радиус-векторы \vec{R} относительно некоторой точки $O \in \Lambda_0$ в области Λ_0 , занимаемой телом, а в текущей конфигурации – радиус-векторы $\vec{r} = \vec{r}(\vec{R})$. Перемещение из положения \vec{R} в положение \vec{r} характеризует вектор $\vec{u} = \vec{r} - \vec{R}$.

В отсчетной конфигурации любая материальная точка $b \equiv b_2 \in B$ имеет радиус-вектор $\vec{L}_{12} = \vec{R}_2 - \vec{R}_1 \equiv \vec{R}_2 - \vec{R}$ относительно другой аналогичной точки $b_1 \in B$. В текущей конфигурации – вектором $\vec{l}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \equiv \vec{r}_2 - \vec{r}$. Справедливо выражение

$$\vec{l}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = (\vec{u}_2 - \vec{u}_1) + (\vec{R}_2 - \vec{R}_1) = \vec{u}_{12} + \vec{L}_{12}. \quad (1)$$

Функция $\vec{u}_{12}(\vec{L}_{12})$ может быть представлена в виде ряда:

$$\vec{l}(\vec{L}) - \vec{L} \equiv \vec{l}_{12} - \vec{L}_{12} = \vec{u}_{12}(\vec{L}) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{d^n \vec{u}}{d \vec{L}^n} \right)^{\text{n раз}} \cdot \dots \cdot \vec{L}^n. \quad (2)$$

Здесь $\vec{L}^2 = \vec{L} \vec{L} \equiv \vec{L} \otimes \vec{L}$ – диада; $\vec{L}^3 = \vec{L} \vec{L} \vec{L} \equiv \vec{L} \otimes \vec{L} \otimes \vec{L}$ – триада и т.д.; \otimes – знак диадного произведения; $\overbrace{\dots}^{\text{n раз}}$ – свертка двух тензоров n раз, в качестве векторов \vec{L} и \vec{l} приняты векторы \vec{L}_{12} и \vec{l}_{12} , градиенты $\frac{d^n \vec{u}}{d \vec{L}^n}$ определены в центре инерции частицы $dB \subset B$. Векторы \vec{L}_{1j} , \vec{l}_{1j} , \vec{u}_{1j} характеризуют положение частицы $dB_j \subset B$ относительно частицы $dB_1 \subset B$ в соответствующей конфигурации и ее перемещение относительно $dB_1 \subset B$ при деформации тела B . Входящие в выражение (2) градиенты определены в центре инерции частицы $dB \equiv dB_1$. Их множество $\{\nabla^n \vec{u}\}_{n=1}^{\infty}$ характеризует ее деформированное состояние.

Потенциальная энергия континуума B равна сумме потенциальных энергий его частиц dB .

$$W_B = \int_{\Lambda} w dV = \int_{\Lambda} dW. \quad (3)$$

Здесь $dW = w dV$ – энергия частицы dB . Это сумма энергий всех взаимодействий dB со всеми другими частицами dB_2 , их парами dB_2, dB_3 и т.д.

$$w = \int_{\Lambda} \Phi^{(2)} dV_2 = \int_{\Lambda} dV_2 \int_{\Lambda} \Phi^{(3)} dV_3 + \dots. \quad (4)$$

Поэтому энергии $d^{(2)}W$ и $d^{(3)}W$ пары (dB, dB_2) и тройки (dB, dB_2, dB_3) (далее учитываются только парные и тройные взаимодействия) пропорциональны объемам частиц, образующих соответствующую пару и тройку.

$$d^{(2)}W = \Phi^{(2)} dV dV_2, \quad d^{(3)}W = \Phi^{(3)} dV dV_2 dV_3. \quad (5)$$

Коэффициенты пропорциональности $\Phi^{(2)}$ и $\Phi^{(3)}$ (далее потенциалы) зависят от параметров, характеризующих исследуемый материал, а также от расстояний l_{12} – для парных взаимодействий, l_{12} и l_{13} – для тройных взаимодействий и т.д.

Сила $d\vec{F}_B = \vec{f}_B dV$, действующая на частицу dB со стороны ее окружения внутри тела B , определяется равенством:

$$d\vec{F}_B = \vec{f}_B dV = \left[\int_{\Lambda} \frac{d\Phi_{12}^{(2)}}{d\vec{L}_{12}} dV_2 + \int_{\Lambda} dV_2 \int_{\Lambda} \left(\frac{d\Phi_{12}^{(2)}}{d\vec{L}_{12}} + \frac{d\Phi_{12}^{(2)}}{d\vec{L}_{13}} \right) dV_3 \right] dV. \quad (6)$$

Отсюда видно, что даже в отсчетном состоянии находящаяся в равновесии частица dB подвержена действию внутренних сил со стороны ее окружения несмотря на отсутствие внешних воздействий на тело B .

Кроме силы $d\vec{F}_B = \vec{f}_B dV$ на частицу dB могут действовать внешние объемные силы $d\vec{F}_{\infty} = \vec{f}_{\infty} dV$. Так что балансовое уравнение для импульса $d(m_B \partial \vec{u} / \partial t) = \rho(\partial \vec{u} / \partial t) dV$ частицы dB имеет следующий вид:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \vec{f}_{\infty} + \vec{f}_B. \quad (7)$$

Подставив сюда выражение для вектора \vec{f}_B , вытекающие из определения (6), можно получить интегральное уравнение относительно неизвестного вектора $\vec{u}(\vec{R}, t)$.

1.2 Локальная модель

Локальной моделью напряженно-деформированного состояния материала континуума B в данной работе считается такая модель, в которой характеристики кинематики любой частицы $dB \subset B$ при переходе в актуальную конфигурацию происходит под действием реакции ее материала, развившейся в той же частице из-за внешних воздействий на тело B [7]. Кинематика любой частицы $dB \subset B$ характеризуется множеством $\{\nabla^n \vec{u}\}_{n=1}^{\infty}$ градиентов вектора перемещений, определенных в центре инерции частицы. Множество $\{\nabla^n \vec{u}\}_{n=1}^{\infty}$ градиентов определяется путем построения ряда (2). В зависимости от решаемой задачи число членов этой последовательности ограничивается заранее выбранным числом N .

Реакцией частицы $dB \subset B$ на ее деформацию является множество тензоров напряжений $\{P^{(n)}\}_{n=1}^{\infty}$ разных рангов $n+1$ (общее число используемых тензоров также как и множество градиентов может быть ограничено). Это множество строится следующим образом.

Для вектора $d\vec{F}_B = \vec{f}_B dV$ существует тензор P такой, что:

$$d\vec{F}_B = \vec{f}_B dV = \nabla \cdot P dV. \quad (8)$$

В свою очередь тензор P можно представить в виде

$$P = P^{(1)} - \nabla \cdot (P^{(2)} - \nabla \cdot (P^{(3)} - \dots)). \quad (9)$$

Изменение dw объемной плотности w потенциальной энергии частицы dB при изменениях $d(\nabla^n \vec{u})$ ее кинематических характеристик является полным дифференциалом. Учитывая это, можно показать, что:

$$dw = \sum_n dw = \sum_n P^{(n)} \cdot \dots \cdot d(\nabla^n \vec{u})^T, \quad (10)$$

$$P^{(n)} = \frac{\partial w}{\partial (\nabla^n \vec{u})}. \quad (11)$$

Для зависимости величины w от градиентов перемещений (учитывая их малую величину) можно принять, что она является полиномом второй степени относительно этих градиентов:

$$w = w_* + \sum_n w_{(\nabla^n \vec{u})} \cdot \dots \cdot (\nabla^n \vec{u})^T + \sum_{n,m} (\nabla^m \vec{u}) \cdot \dots \cdot w_{(\nabla^m \vec{u})(\nabla^n \vec{u})} \cdot \dots \cdot (\nabla^n \vec{u})^T. \quad (12)$$

Запятая в (12) означает производную по выражению, на месте нижнего индекса.

В этом случае тензоры напряжений имеют вид:

$$P^{(n)} = P_0^{(n)} + \sum_{m=1}^{m=N} C^{(m,n)} \cdot \dots \cdot (\nabla^m \vec{u})^T, \quad (13)$$

$$P_0^{(n)} = \Psi, \quad_{(\nabla^n \vec{u})} = w, \quad_{(\nabla^n \vec{u})} = \int_A \left(\frac{d \Phi^{(2)}}{d \bar{L}_{12}} \right) \vec{l}_{12}^n dV_2 + \sum_{j=2}^3 \int_A \left[\int_A \left(\frac{d \Phi^{(3)}}{d \bar{L}_{1j}} \right) \vec{l}_{1j}^n dV_2 \right] dV_3, \quad (14)$$

$$C^{(m,n)} = \int_A \vec{l}_{12}^n \left(\frac{d^2 \Phi^{(2)}}{d \bar{L}_{12}^2} \right) \vec{l}_{12}^m dV_2 + \sum_{p,q=2}^3 \int_A \left[\int_A \vec{l}_{1p}^n \left(\frac{d^2 \Phi^{(2)}}{d \bar{L}_{1p} d \bar{L}_{1q}} \right) \vec{l}_{1q}^m dV_2 \right] dV_3. \quad (15)$$

В выражениях (13) – (15) тензоры $P_0^{(n)}$ и $C^{(m,n)}$ характеризуют механические свойства исследуемого материала. Первый из них характеризует внутренние начальные напряжения, которые присутствуют в материале даже при отсутствии его деформаций в произвольной частице dB . Второй характеризует способность материала сопротивляться развитию в нем деформаций и неравномерности их распределения в ней.

2 Состояние переходного слоя и пограничных слоев плоской трещины в окрестности ее вершины

2.1 Представление о плоской трещине

Рассматривается состояние переходного слоя и пограничных слоев плоской трещины в окрестности ее вершины.

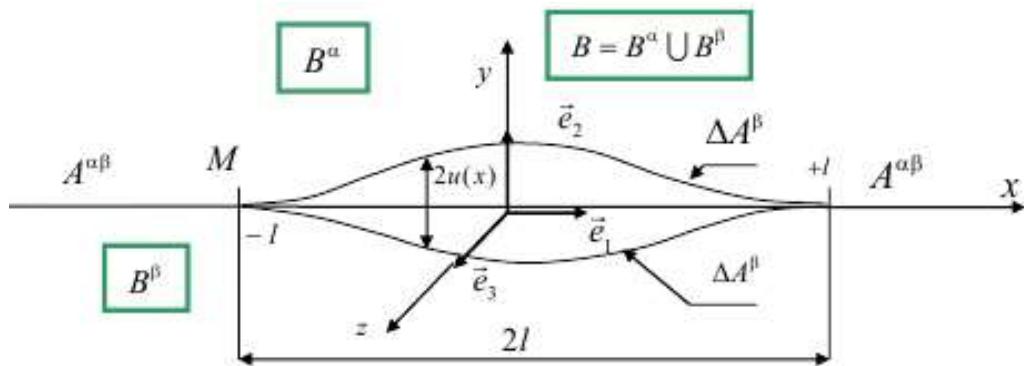


Рисунок 1 – Расчетная схема рассматриваемой плоской трещины

Предполагается, что до появления трещины тело B являлось объединением вдоль плоскости $A \equiv A^{\alpha\beta}$ двух полубесконечных тел B^α и B^β : $B = B^\alpha \cup B^\beta$. Эти тела ограничены плоскостями A^α и A^β , которые до появления трещины полностью совпадают с плоскостью A . Уравнения равновесия тел B^α и B^β имеют вид:

$$\nabla \cdot P^\alpha + \vec{f}^{\beta\alpha} = 0, \quad \nabla \cdot P^\beta + \vec{f}^{a\beta} = 0. \quad (16)$$

Здесь P^α , P^β – тензоры P напряжений, развившихся в контактирующих телах; $\vec{f}^{\beta\alpha}$ – сила действия B^β на B^α , $\vec{f}^{a\beta}$ – сила действия B^α на B^β .

2.2 Переходный и поверхностный слои вблизи вершины трещины

Пусть $\mathfrak{R}(M)$ – бесконечно малая окрестность левой вершины трещины – точки $(M : x = -l, z = 0)$ на плоскости $z = 0$. В области $x < -l$ вдоль плоскости $A \equiv A^{\alpha\beta}$ выполняются условия сопряжения не равных нулю напряжений и деформаций, развившихся в телах B^α и B^β . В области $x > -l$ вдоль берегов ΔA^α и ΔA^β поверхностное воздействие одного из тел B^α и B^β на другое равны нулю, а берега ΔA^α и ΔA^β перестают быть плоскими. Рассуждения опираются на то, что в рамках локальной модели для характеристики кинематики поверхностного слоя необходимо использовать не менее двух первых градиентов перемещений ($N \geq 2$).

Согласно изложенной выше локальной модели, на части поверхности A сплошного контакта [8] тел B^α и B^β ($x < -l$) должны выполняться следующие условия сопряжения их характеристик кинематики и напряжений НДС.

$$\vec{u}^\alpha = \vec{u}^\beta, \quad (17)$$

$$\vec{n} \cdot (P^{\alpha(1)} - \nabla \cdot P^{\alpha(2)}) - \nabla_A \cdot (\vec{n} \cdot P^{\alpha(2)}) = \vec{n} \cdot (P^{\beta(1)} - \nabla \cdot P^{\beta(2)}) - \nabla_A \cdot (\vec{n} \cdot P^{\beta(2)}), \quad (18)$$

$$\nabla \vec{u}^\alpha = \nabla \vec{u}^\beta, \quad (19)$$

$$\vec{n} \cdot P^{\alpha(2)} = \vec{n} \cdot P^{\beta(2)}. \quad (20)$$

Тензоры напряжений в этих равенствах определяются выражением (13), в котором принято $N = 2$.

Если материалы тел B^α и B^β одинаковы, то одинаковы и их материальные тензоры $P_0^{(n)}$ и $C^{(m,n)}$, условия сопряжения выполняются тождественно, переходный слой отсутствует. Если же материалы тел B^α и B^β разные, то материальные тензоры $P_0^{(n)}$ и $C^{(m,n)}$ являются разными. Кроме того, они являются переменными в связи со следующими обстоятельствами.

Частицы каждого из контактирующих тел, находящихся вблизи от поверхности контакта $A \equiv A^{\alpha\beta}$, оказываются под влиянием нелокальных сил, действующих на них со стороны потенциальных полей собственного тела и тела, которое контактирует с собственным. Так что плотности потенциалов парного и тройного взаимодействия частиц, например, тела B^α с их окружением в обоих телах B^α и B^β определяются равенствами

$$\Phi_\alpha^{(\alpha)} = \Phi_{\alpha\alpha}^{(2)} + \Phi_{\alpha\beta}^{(2)}, \quad \Phi_\alpha^{(3)} = \Phi_{\alpha\alpha}^{(3)} + \Phi_{\alpha\beta}^{(3)}. \quad (21)$$

Подстановка этих выражений в определения (14) и (15) приводит тому, что тензоры $P_0^{(n)}$ и $C^{(m,n)}$ оказываются переменными из-за того, что по мере удаления частицы dB^α от поверхности $A \equiv A^{\alpha\beta}$ действие поля, создаваемого телом B^β , а значит и нелокального действия его частиц на частицу dB^α убывает. Значит, убывают и потенциалы $\Phi_{\alpha\beta}^{(2)}$ и $\Phi_{\alpha\beta}^{(3)}$. При этом нарастает действие частиц $dB^{\alpha*} \in B^\alpha$, окружающих dB^α внутри собственного тела. Следствием этого оказывается то, что тензоры $P_0^{(n)}$ и $C^{(m,n)}$ при пересечении плоскости контакта переходят от значений, характерных для тела B^β к значениям, характерным для тела B^α . Например, для тензора $C^{(1,1)}$ классических напряжений при учете только парных взаимодействий в переходном слое оказывается справедливым выражение

$$C^{(1,1)} = \int_V \vec{l} \left(\frac{d^2 \Phi^{(2)}}{d \vec{l}^2} \right) \vec{l} dV_2 = \begin{cases} C_{\alpha\alpha}^{(1,1)}(\vec{r}) + C_{\beta\alpha}^{(1,1)}(\vec{r}), & \vec{r} \in \Lambda^\alpha \\ C_{\alpha\beta}^{(1,1)}(\vec{r}) + C_{\beta\beta}^{(1,1)}(\vec{r}), & \vec{r} \in \Lambda^\beta \end{cases}. \quad (22)$$

В правой части этого выражения слагаемые с одинаковыми нижними индексами характеризуют напряжения, возникшие из-за взаимодействия частиц внутри одного тела, меняющегося при удалении от границы в его глубину. Слагаемые с разными индексами являются добавкой, обусловленной влиянием частиц другого тела.

В окрестности вершины трещины при $x > -l$ картина меняется. Здесь происходит переход от слоя, являющегося объединением соответствующего сплошному адгезионному контакту полубесконечных тел B^α и B^β граничных слоев каждого из них, к пограничным слоям тех же тел, отделенных друг от друга. При этом характер взаимодействия между B^α и B^β меняется. В области вдоль берегов ΔA^α и ΔA^β поверхностное воздействие одного из тел B^α и B^β на другое равны нулю, а берега ΔA^α и ΔA^β перестают быть плоскими.

Пусть размеры трещины так велики, что в месте наибольшего удаления ее берегов друг от друга нелокальным влиянием второго берега на первый можно пренебречь. Тогда граница ΔA^α , а также прилегающий к ней слой материала окажутся свободными от внешних воздействий. Вдоль нее сформируется пограничный слой с переменными механическими свойствами и характеристиками напряженно-деформированного состояния характерными только для материала тела B^α . При этом в выражениях (21) и (22) сохраняются только слагаемые с одинаковыми нижними индексами. Тензор P^α напряжений, развивающихся в теле B^α , таков, что удовлетворяет условию:

$$\nabla \cdot P^\alpha = 0. \quad (23)$$

По мере приближения берега ΔA^β к берегу ΔA^α при «движении» к вершине трещины нелокальные силы тела B^β начинают действовать с увеличивающейся интенсивностью на частицы приграничного слоя тела B^α . Аналогичная ситуация будет наблюдаться с телом B^β не зависимо от того, одинаков ли его материал с материалом тела B^α или нет.

При слиянии границ A^α и A^β (участок $A^{\alpha\beta}$) в случае совпадения материалов тел B^α и B^β пограничные слои этих тел полностью исчезают, так как в этом случае тело B^α оказывается добавлением тела B^β до однородного тела B . Кроме того $\Phi_{\alpha\alpha}^{(2)} = \Phi_{\alpha\beta}^{(2)}$, $\Phi_{\alpha\alpha}^{(3)} = \Phi_{\alpha\beta}^{(3)}$, а в (14) и (15) интегрирование по dV_2 и dV_3 слагаемых с $\Phi_{\alpha\alpha}^{(k)}$ проводится по области Λ^α , слагаемых с $\Phi_{\alpha\beta}^{(k)}$ – по области Λ^β . Если же материалы тел B^α и B^β разные, то в окрестности участка $A^{\alpha\beta}$ образуется слой материала (переходный слой), в котором осуществляется переход от свойств тела B^α к свойствам тела B^β .

2.3 Характеристика НДС тел B^α и B^β в окрестности вершины трещины

Цель рассуждений – показать, что при переходе из области $x < -l$ в область $x > -l$ зависимости от x функций, характеризующие кинематику материала, могут быть ограниченными и гладкими. Описание НДС в окрестности $\mathfrak{R}(M)$ вершины трещины в рамках классической теории упругости приводит к обратному результату [9]. Рассуждения опираются на то, что в рамках локальной модели для характеристики кинематики поверхностного слоя необходимо использовать не менее двух первых градиентов ($N \geq 2$).

Согласно изложенной выше локальной модели, на части поверхности A сплошного контакта [8] тел B^α и B^β ($x < -l$) должны выполняться следующие условия (17) – (20) сопряжения характеристик кинематики и напряжений НДС. Эту систему условий сопряжения можно продолжить, в частности, равенством вторых градиентов перемещений:

$$\nabla^2 \vec{u}^\alpha = \nabla^2 \vec{u}^\beta. \quad (24)$$

Тензоры – градиенты второго порядка в равенстве (24) характеризуют неравномерность продольных деформаций и кривизну материальных волокон тел B^α и B^β в области ($x < -l$) $\subset \mathfrak{R}(M)$ одинаково ориентированных относительно плоскости $A \equiv A^{\alpha\beta}$. В частности, волокна, лежащие на этой плоскости, ориентированные вдоль продольной оси трещины, (образующие ее участки, принадлежащие плоскостям A^α A^β), имеют кривизну, равную нулю:

$$\frac{\partial^2 u_y^\alpha}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u_y^\beta}{\partial x^2} = 0. \quad (25)$$

Это означает, что при образовании трещины под действием равномерно распределенного растяжения плоскости A^α A^β , перпендикулярные растяжению, не потеряют свою пространственную форму и ориентацию. При этом модули поверхностных сил, с которыми тела B^α и B^β действуют друг на друга, не равны нулю и являются конечными величинами даже при отсутствии деформаций материала из-за того, что в материале существуют начальные напряжения с конечной величиной нормы $\|P_0^{(n)}\|$.

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot (P^{\alpha(1)} - \nabla \cdot P^{\alpha(2)}) - \nabla_A \cdot (\vec{n} \cdot P^{\alpha(2)}) &\neq 0, \quad \vec{n} \cdot (P^{\beta(1)} - \nabla \cdot P^{\beta(2)}) - \nabla_A \cdot (\vec{n} \cdot P^{\beta(2)}) \neq 0, \\ \|\vec{n} \cdot P^{\alpha(2)}\| &\neq 0. \end{aligned} \quad (26)$$

При переходе через точку ($M : x = -l, z = 0$) в область $x > -l$ происходит скачкообразное изменение условий взаимодействия B^α и B^β , а также условий на их границах ΔA^α и ΔA^β . Неравенства (26) преобразуются в равенства. Вдоль границ ΔA^α и ΔA^β , входящих в область ($x > +l$) $\subset \mathfrak{R}(M)$, должны выполняться условия

$$\vec{n}^\alpha \cdot (P^{\alpha(1)} - \nabla \cdot P^{\alpha(2)}) - \nabla_A \cdot (\vec{n}^\alpha \cdot P^{\alpha(2)}) = 0, \quad \vec{n}^\alpha \cdot P^{\alpha(2)} = 0, \quad (27)$$

$$\vec{n}^\beta \cdot (P^{\beta(1)} - \nabla \cdot P^{\beta(2)}) - \nabla_A \cdot (\vec{n}^\beta \cdot P^{\beta(2)}) = 0, \quad \vec{n}^\beta \cdot P^{\beta(2)} = 0. \quad (28)$$

Ввиду того, что окрестность точки $(M : x = -l, z = 0)$ является бесконечно малой, изменением тензоров $P_0^{(n)}$ и $C^{(m,n)}$ внутри нее при переходе через точку M можно пренебречь.

Если в (27) и (28) подставить выражения (13) для тензоров напряжений, то для зависимостей $\bar{u}^\alpha(x)$ и $\bar{u}^\beta(x)$ можно получить неоднородные (из-за неравенств $P_0^{(1)} \neq 0$ и $P_0^{(2)} \neq 0$) дифференциальные уравнения третьего порядка, решение которых существует и свидетельствует о возникновении и развитии, начиная с нулевого значения, кривизны поверхностей ΔA^α и ΔA^β в точке M . Это является кинематическим свидетельством возникновения расслоения материала. В окрестности угловой точки M возникают ограниченные по величине деформации и напряжения. При этом можно показать, что функции $\bar{u}^\alpha(x)$ и $\bar{u}^\beta(x)$ являются ограниченными и гладкими.

Заключение

Изложенные выше теоретические рассуждения о состоянии переходного слоя материала в окрестности вершины трещины свидетельствуют о том, что нелокальная модель упругой среды, на основе которой они проведены, может быть использована для реализации теории Баренблатта о взаимодействии берегов трещин посредством нелокальных поверхностных сил.

Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-01466-23-07 на 2023 – 2025 гг. от 24.11.2023 г., проект № FSGN-2023-002 (1023082800024-8-1.3.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вильчевская Е.Н. О переходных слоях в композитных материалах как областях новой фазы / Е.Н. Вильчевская, Р.А. Филиппов, А.Б. Фрейдин // Механика твердого тела. – 2013. – №1. – С. 113 – 144.
2. Волков – Богородский Д.Б. Решение задачи Эшелби в градиентной теории упругости для многослойных сферических включений / Д.Б. Волков – Богородский, С.А. Лурье // Механика твердого тела. – 2016. – №2. – С. 32 – 50.
3. Gutkin M.Iu. Emissiia chasticnykh dislokatsii granitsami zeren v nanokristallicheskikh metallakh / M.Iu. Gutkin, I.A. Ovid'ko, N.V.Skiba // Fizika tverdogo tela, 2004. – Vol. 46. – № 11. – S. 1975 – 1985.
4. Чураев Н.В. Поверхностные силы и физикохимия поверхностных явлений / Н.В. Чураев // Успехи химии, 2004. – Том 73. – Вып. 1. – С. 26 – 38.
5. Presnetsova V.Yu. A variant of describing adhesion interaction in the probe sample system of an atomic-force microscope / V.Yu. Presnetsova, S.N. Romashin, L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin, S.I. Yakushina // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2018. – Vol. 9 (4), 299323. <http://dx.doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2018026714>.
6. Баренблatt Г.И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении / Г.И. Баренблatt // Прикл. мех. техн. физ. – 1961. – Том 2. – Вып. 4. – С. 3 – 56.
7. Зубчанинов В.Г. Механика процессов пластических сред / В.Г. Зубчанинов. – М.: Физматлит, 2010. – 352 с.
8. Фроленкова Л.Ю. Поверхностная энергия и энергия адгезии упругих тел / Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин // Изв. РАН. МТТ. – 2017. – № 1. – С. 76 – 91.
9. Райзер Ю.П. Физические основы теории трещин хрупкого разрушения / Ю.П. Райзер // Успехи физических наук. – 1970. – Т. 100. – Вып. 2. – С. 329 – 347.

Шоркин Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры технической физики и
математики
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел. +7 (960) 655-00-77
E-mail: v.s.shorkin@yandex.ru

Фроленкова Лариса Юрьевна

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический
университет», г. Москва
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
индустримального программирования,
119311, Москва, Пр-т Вернадского, д. 78
Тел.: + 7 (910) 301-73-20,
E-mail: frolenkova@mirea.ru

Ромашин Сергей Николаевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры технической физики и математики
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел.: +7 (919) 267-71-26,
E-mail: sromashin@yandex.ru

Конищева Алёна Игоревна

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел
студент
г. Орел ул. Московская д. 34
Тел.: + 7(920) 725-03-77
E-mail: konishevaalena123@gmail.com

SHORKIN V.S., FROLENKOVA L.Yu., ROMASHIN S.N., KONISHEVA A.I.

TRANSITION LAYER IN THE VICINITY OF A CRACK TIP AT THE INTERFACE OF AN ADHESIVE CONTACT

Abstract. This paper presents a theoretical description of the transition layer in the vicinity of a crack tip that forms at the interface of adhesive contact between two elastic bodies made of dissimilar materials due to delamination under the action of external or internal forces. It is shown that the application of a nonlocal model of the elastic state of a solid material allows one to confirm Barenblatt's hypotheses regarding the finiteness of stresses and strains in the region under consideration. This finiteness arises from the existence of nonlocal interactions among continuum particles, which complement their contact interactions. The proposed description is also valid for homogeneous elastic materials in which cracks emerge for any reason.

Keywords: transition layer, elastic material, plane crack, Barenblatt's theory, nonlocal model.

BIBLIOGRAPHY

1. Vil'chevskaya E.N. O perekhodnyh sloyah v kompozitnyh materialah kak oblastyah novoj fazy / E.N. Vil'chevskaya, R.A. Filippov, A.B. Frejdin // Mekhanika tverdogo tela. – 2013. – №1. – S. 113 – 144.
2. Volkov – Bogorodskij D.B. Reshenie zadachi Eshelbi v gradientnoj teorii uprugosti dlya mnogoslojnyh sfericheskikh vklyuchenij / D.B. Volkov – Bogorodskij, S.A. Lur'e // Mekhanika tverdogo tela. – 2016. – №2. – S. 32 – 50.
3. Gutkin M.Iu. Emissiia chasticchnykh dislokatsii granitsami zeren v nanokristallicheskikh metallakh / M.Iu. Gutkin, I.A. Ovid'ko, N.V. Skiba // Fizika tverdogo tela, 2004. – Vol. 46. – № 11. – S. 1975 – 1985.
4. CHuraev N.V. Poverhnostnye sily i fizikohimiya poverhnostnyh yavlenij / N.V. CHuraev // Uspekhi himii, 2004. – Tom 73. – Vyp. 1. – S. 26 – 38.
5. Presnetsova V.Yu. A variant of describing adhesion interaction in the probe sample system of an atomic-force microscope / V.Yu. Presnetsova, S.N. Romashin, L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin, S.I. Yakushina // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2018. – Vol. 9 (4), 299323. <http://dx.doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2018026714>.
6. Barenblatt G.I. Matematicheskaya teoriya ravnovesnyh treshchin, obrazuyushchihsya pri hrupkom razrushenii / G.I. Barenblatt // Prikl. mekh. tekhn. fiz. – 1961. – Tom 2. – Vyp. 4. – S. 3 – 56.
7. Zubchaninov V.G. Mekhanika processov plasticheskikh sred / V.G. Zubchaninov. – M.: Fizmatlit, 2010. – 352 s.
8. Frolenkova L.YU. Poverhnostnaya energiya i energiya adgezii uprugih tel / L.YU. Frolenkova, V.S. Shorkin // Izv. RAN. MTT. – 2017. – № 1. – S. 76 – 91.
9. Rajzer YU.P. Fizicheskie osnovy teorii treshchin hrupkogo razrusheniya / YU.P. Rajzer // Uspekhi fizicheskikh nauk. – 1970. – T. 100. – Vyp. 2. – S. 329 – 347.

Shorkin Vladimir Sergeevich

Orel State University, Orel
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Technical Physics and
Mathematics
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
Ph.: +7 (960) 655-00-77
E-mail: v.s.shorkin@yandex.ru

Romashin Sergey Nikolaevich

Orel State University, Orel,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate professor of the Department of Technical Physics
and Mathematics
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
Ph.: +7 (919) 267-71-26,
E-mail: sromashin@yandex.ru

Frolenkova Larisa Yuryevna

MIREA – Russian Technological University
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department of Industrial
Programming,
119311, Moscow, Vernadsky Ave., 78
Ph.: + 7 (910) 301-73-20
E-mail: frolenkova@mirea.ru

Konisheva Alena Igorevna

Orel State University, Orel,
student
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
Ph.: + 7(920) 725-03-77
E-mail: konishevaalena123@gmail.com

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК.621.77.07

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-374-6-22-26

НИЗМЕЕВ А.А., ДОРОХОВ Д.О.

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ГЕОМЕТРИИ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос о выборе геометрии инструмента для деформирования осесимметричных изделий типа проволоки, прутков. Для этого применён геометрический подход. Показано, что в качестве основной геометрии для деформирования подобных заготовок могут быть использованы поверхности, образованные вращением: параболы, гиперболы и графика функции натурального логарифма.

Ключевые слова: конические сечения, инструмент для деформирования, деформирование осесимметричных заготовок, парабола, гипербола, геометрия инструмента.

Введение

Рассмотрим процесс деформирования цилиндрических осесимметричных заготовок (прутков, проволоки, труб) в каналах инструмента без изменения формы сечения. Последними могут выступать волоки в процессах волочения, бойки при ротационном и радиальном обжатии, матрицы с круглым отверстием при прессовании и иные инструменты [1, 2]. Определяющим должно являться то, что они формируют закрытый канал, через который проходит заготовка круглого поперечного сечения в процессе уменьшения своего диаметра. В рассматриваемых инструментах выделим основной участок - заходный конус или входная зона, - это тот элемент, в котором происходит основное деформирование заготовки, то есть начальный диаметр d_0 изменяется на конечный d_1 . Геометрия данного участка имеет основополагающее значение, которое во многом определяет энергосиловые параметры того или иного способа обработки металлов давлением. В рассматриваемой постановке не принципиален состав инструмента (цельная матрица или волока, два бойка при радиальном обжатии или четыре при ротационной ковке), основным является то, что инструменты имеют участок, где происходит изменение параметра сечения с d_0 до d_1 . Данный участок в общем виде представляет поверхность вращения, при этом ось вращения совпадает с осью заготовки (см. рисунок 1).

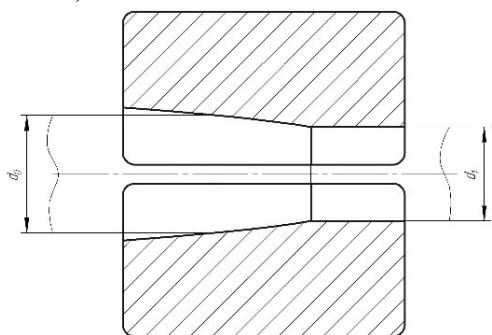


Рисунок 1 - Общая схема процесса формообразования

Постановка задачи

В рассматриваемом примере данную задачу можно решить как вариационную, то есть определить некоторые граничные условия, поставить условие минимума или максимума и по итогу определить вид кривой. А можно использовать известные решения, как это показано в [3], где поставлено условие по минимизации площади пятна контакта при заданной глубине

внедрения индентора в процессе упрочняющего комплексного локального деформирования. Данная постановка эквивалентна решению следующей известной задачи: какая поверхность вращения, проходящая через две точки $P_1(x_1, y_1)$ и $P_2(x_2, y_2)$ в плоскости xOy , где $x_1 < x_2$, образованная вращением кривой $y=f(x)$ вокруг оси Ox , имеет наименьшую возможную площадь (см. рисунок 2). Последнее известно, как проблема Плато, а решением является поверхность, образованная вращением цепной линии, называемая катеноидом.

Для упрощения перейдем к рассмотрению кривой (ее участка), которая, вращаясь вокруг оси заготовки, формирует геометрию рассматриваемого участка (см. рисунок 2) подобно тому, как делали ранее в [3].

Основная часть

Применим иной подход и рассмотрим движение заготовки по указанному участку. Пусть заготовка, имеющая круглое поперечное сечение, проходит рассматриваемый участок канала инструмента, при этом его геометрия неизвестна. Зафиксируем некоторое начальное положение заготовки - выделим в нем определенное сечение, в плоской постановке проведем через него прямую линию. Предположим, что каждое сечение остаётся плоским и параллельным начальному при движении заготовки по каналу. Расстояние от начального до любого сечения в канале обозначим как PP' , при этом точка P - это точка касания сечения с каналом, а точка P' - пересечение перпендикуляра, опущенного из точки P с прямой, проходящей через начальное сечение. Так как инструмент неподвижен, то связем его с некоторой точкой F (эта точка может и не принадлежать телу инструмента). Обратим внимание, что начальное сечение, положение которого определяется прямой, где лежат все точки P' , выбрано произвольно, поэтому положение точки F относительно рассматриваемой линии может быть любым. Все сечения, как принято выше, до вхождения в канал, во время деформирования и после выхода заготовки параллельны друг другу. Расстояние от точки, характеризующей положение сечения P , до фиксированной точки, связанной с инструментом F , есть отрезок PF (см. рисунок 3).

Точка P определяется геометрией канала - отрезком PF (который подобно вектору может поворачиваться и менять длину), а ее положение зависит от пройденного расстояния относительно начального положения - отрезком PP' (он при движении точки P по каналу меняет свое положение и величину, оставаясь параллельным самому себе в каждом из положений). Движение точки P (которое можно описать, как изменение отрезков PP' и PF) задается геометрией канала, а с другой стороны и определяет её.

Таким образом, имея начальное положение сечения заготовки, точки на нем - P' и инструмент с заданной фиксированной точкой F , изменяя величину отрезков PP' и PF , полностью определим геометрию канала. Так как отрезкам принадлежит общая точка P , то зададим связь их друг другом:

$$|PF| = f(|P'P|) \quad (1)$$

Положим зависимость (1) как линейную, что является наиболее простым вариантом, тогда (1) примет вид:

$$|PF| = e \cdot |P'P| \quad (2)$$

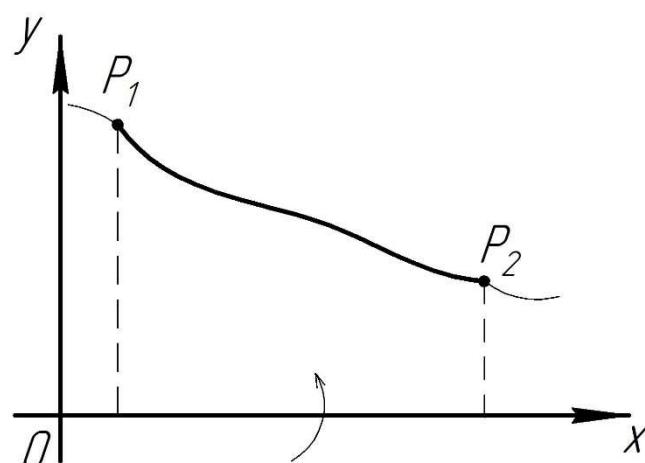


Рисунок 2 - Представление геометрии канала, как произвольной кривой, вращающейся вокруг оси $0x$, которая совпадает с осью заготовки

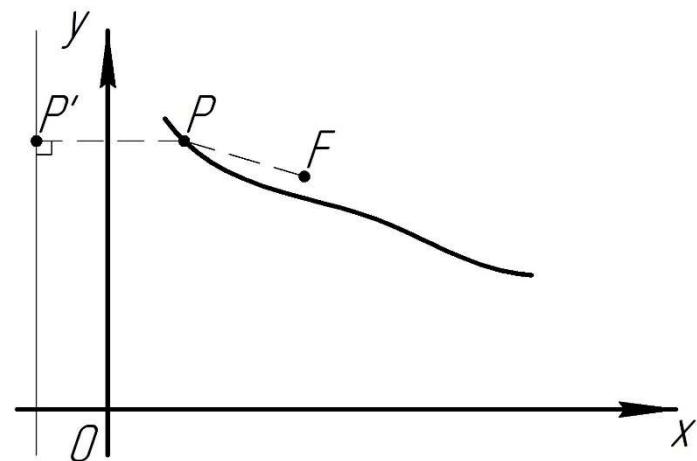


Рисунок 3 - Задача геометрии канала

То есть отношение величины отрезков, определяющих положение точки P , есть величина постоянная при перемещении точки, по каналу. Выражение (2) определит геометрию канала. Нетрудно заметить, что (2) представляет собой описание невырожденного конического сечения через величину эксцентриситета e [4]. Таким образом, прямая, проходящая через начальное сечение, есть директриса, а точка F - фокус конического сечения. Выражение (2) путем введения декартовой системы координат, параметра p , который определяется, как $p = e \cdot |PF|$ (фокальный параметр), и соответствующего преобразования канонического уравнения кривой второго порядка [5] может быть представлено как:

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x - (1 - e^2) \cdot x^2 \quad (3)$$

В представлении (3) кривая проходит через начало системы координат, а ось абсцисс является осью симметрии. Так как $p \neq 0$ и $e \neq 0$, а $e > 0$, то наиболее простыми вариантами выражение (3) являются следующие, при $e = 1$

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x \quad (4)$$

и при $e = \sqrt{2}$

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x + x^2 \quad (5)$$

Уравнение (4) - это каноническое уравнение параболы (см. рисунок 4).

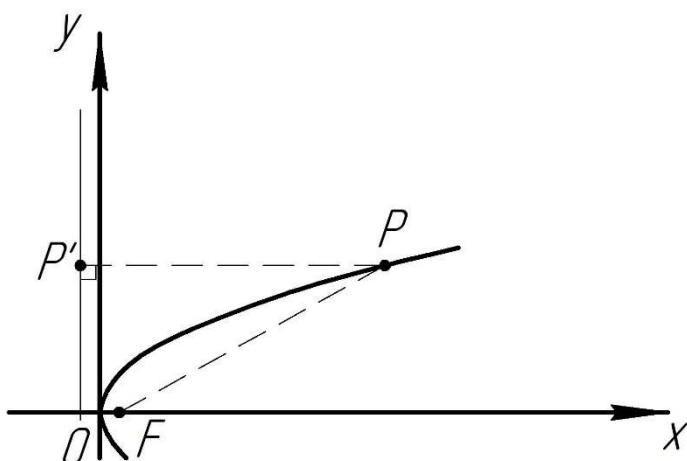


Рисунок 4 - График канонического уравнения параболы

Если (5) представим как $y^2 + p^2 = p^2 + 2 \cdot p \cdot x + x^2$, далее как $y^2 + p^2 = (p + x)^2$ и сместимся по оси абсцисс на $-p$ (см. рисунок 5), то получим:

$$\frac{x^2}{p^2} - \frac{y^2}{p^2} = 1 \quad (6)$$

Выражение (6) - это уравнение равнобочкой гиперболы, т.е. в некоторой системе координат в самом простом виде будем иметь:

$$y_{\perp} = \frac{1}{x_{\perp}} \quad (7)$$

Выражение (7) справедливо для системы координат, повернутой на 45° , т.е. следует рассматривать сечения, повернутые на этот угол в теле заготовки (см. рисунок 6). Зависимость (7) представляет график обратно пропорциональной зависимости, т.е. диаметр при прохождении заготовки уменьшается в зависимости от пройденного расстояния.

Так как рассматриваемые процессы деформирования происходят во времени, то интерес представляет скорость изменения диаметра сечения. Если это предположить как еще один

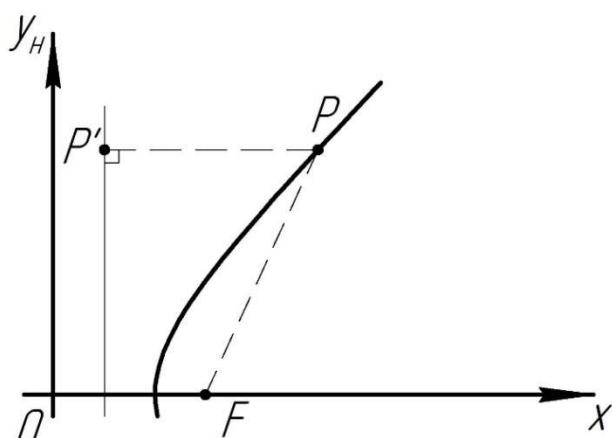


Рисунок 5 - График уравнения равнобочкой гиперболы

поход к выбору кривой, описывающей геометрию рассматриваемого участка инструмента при деформировании, то следует продифференцировать полученные выражения (4) и (7). При этом

(4) проще представить в более знакомом виде $y = a \cdot x^2$ и для простоты принять значение $a = \frac{1}{2}$. Используя такой подход к выражению (4), получим

$$y = x \quad (8)$$

а из (7)

$$y = \ln x \quad (9)$$

Зависимость (8) представляет собой прямую линию с наклоном 45° . Если в (4) варьировать параметр p , или в выражении $y = a \cdot x^2$ советующим образом выбирать a , то в объемном варианте получим описание канала как конуса с различными углами наклона при соответствующих преобразованиях системы координат. Подобные варианты геометрии канала удовлетворительно изучены, поэтому больший интерес представляет исследование зависимостей (4), которая в объеме формирует параболоид вращения, (7) - со сформированным гиперболоидом вращения и (9).

Заключение

Таким образом, пришли к тому, что каналы в инструментах, деформирующих осесимметричные заготовки, могут быть представлены как частные и наиболее простые виды конических сечений. В простом виде это выражается как поверхности полученные вращением кривых: $y = \frac{1}{2}x^2$ и $y = \frac{1}{x}$. Такой подход задает однозначное соотношение между путем перемещением, а следовательно, и деформированием произвольного сечения и его положением относительно инструмента.

Выражение $y = \ln x$ формирует аналогичное соотношение, только между скоростью деформирования сечения и положением инструмента. Детальная проработка и практическое воплощение какого-либо производственного процесса с использованием инструмента, формирующего данную геометрию, представляет собой актуальную задачу. При этом представляет интерес инженерный расчет энергосиловых параметров процесса, решение которого позволит упростить вычисления и изучить закономерности изменения параметров технологии по мере заполнения канала инструмента.

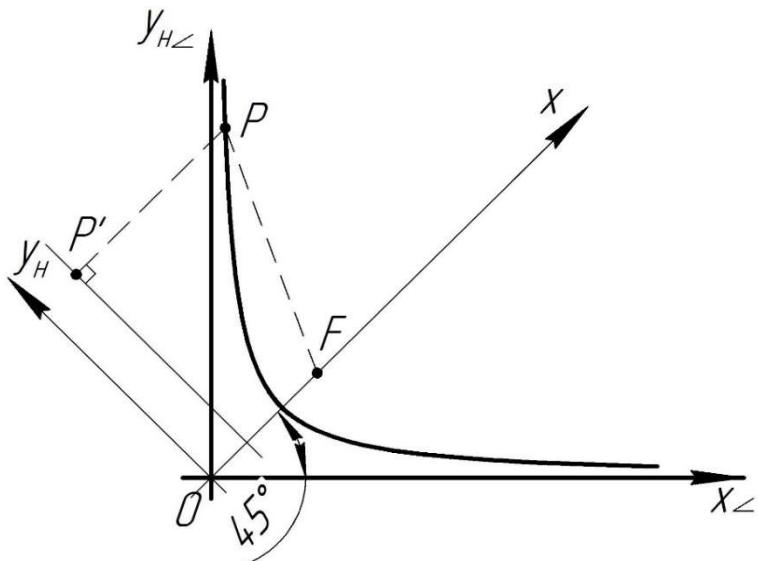


Рисунок 6 - График обратно пропорциональной зависимости

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охрименко, Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я.М. Охрименко. - М.: Машиностроение, 1976. - 560 с.
2. Гредитор, М.А. Давильные работы и ротационное выдавливание / М.А. Гредитор. - М.: Машиностроение, 1971. - 232 с.
3. Дорохов, Д. О. Управляемое градиентное упрочнение осесимметричных изделий комплексным локальным нагружением очага деформации : специальность 05.02.09 "Технологии и машины обработки давлением" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Дорохов Даниил Олегович, 2018. – 285 с.

4. Геометрия: [учебное пособие для вузов по специальности "Математика"] / А. В. Погорелов. - Москва : Наука, 1983. - 287 с.

5. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендейев. - 13-е изд., испр. - Москва : Наука, 1986. - 544 с.

Низмеев Александр Александрович

АО «Навлинский завод «Промсвязь», р.п. Навля,
Брянская обл.
Инженер-конструктор
242130, Брянская обл., р.п. Навля,
ул. Комсомольская, д. 1
E-mail: scientist95@yandex.ru

Дорохов Даниил Олегович

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел
Доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры машиностроения
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. +79102084402
E-mail: ddostu@mail.ru

NIZMEYEV A.A., DOROHOV D.O.

ON THE CHOICE OF GEOMETRY FOR DEFORMING AXIS-SYMMETRIC PRODUCTS

Abstract. The article discusses the choice of tool geometry for deforming axisymmetric products such as wires and rods. A geometric approach is used for this purpose. It is shown that surfaces formed by rotation, such as parabolas, hyperbolas, and the graph of the natural logarithm function, can be used as the main geometry for deforming these types of products.

Keywords: conical sections, deformation tool, deformation of axisymmetric workpieces, parabola, hyperbola, tool geometry.

BIBLIOGRAPHY

1. Okhrimenko, Y. M. Technology of forging and stamping production / Y. M. Okhrimenko. - M.: Mashinostroenie, 1976. - 560 p.
2. Greditor, M.A. Crushing operations and rotary extrusion / M.A. Greditor. - M.: Mashinostroenie, 1971. - 232 p.
3. Dorokhov, D. O. Controlled Gradient Hardening of Axisymmetric Products by Complex Local Loading of the Deformation Focal Point : Speciality 05.02.09 "Technologies and Machines for Pressure Processing" : Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences / Dorokhov Daniil Olegovich, 2018. - 285 p.
4. Geometry: [Textbook for Universities in the Field of Mathematics] / A. V. Pogorelov. - Moscow: Nauka, 1983. - 287 p.
5. Handbook of Mathematics for Engineers and Students of Technical Universities [Text] / I. N. Bronstein, K. A. Semendyaev. - 13th edition, revised. - Moscow: Nauka, 1986. - 544 p.

Nizmeyev Alexander Alexandrovich

JSC «Navlinsky Plant «Promsvyaz», Navlya settlement,
Bryansk region
Design Engineer
242130, Bryansk region, Navlya settlement,
Komsomolskaya str., 1
Ph.: +79514964041
E-mail: scientist95@yandex.ru

Dorokhov Daniil Olegovich

«Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel
Ph.D., assistant professor, professor, department of
mechanical engineering
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +79102084402
E-mail: ddostu@mail.ru

© Низмеев А.А., Дорохов Д.О., 2025

ПАНАМАРЕВ Г.Е., ЛЯСКИН А.С., ЕФРЕМОВ А.В.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ АДДИТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ РЕМОНТЕ ОБОРУДОВАНИЯ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Проанализированы отечественные и зарубежные мобильные аддитивные комплексы, оборудование для аддитивного производства. Отмечено, что существующие отечественные комплексы ориентированы на использование технологии печати полимерными материалами. Рассмотрены вопросы качества 3D-печати пластиками, показаны причины появления дефектов печати. Проанализированы возможности оценки качества деталей аддитивной печати в полевых условиях и определены основные трудности этой оценки, выработаны рекомендации по использованию в ремонтных работах деталей, изготовленных по аддитивным технологиям, взамен оригинальных, изготовленных в заводских условиях.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, филамент, мобильный ремонтный комплекс

Введение

Одним из путей сокращения сроков ремонта техники в местах ее эксплуатации является использование оборудования аддитивных технологий, размещенного в мобильных ремонтных комплексах (далее – МРК) [1-3]. Такие комплексы, осуществляющие изготовление небольших деталей, взамен вышедших из строя, незаменимы в труднодоступных, удаленных регионах России, например, на участках эксплуатации нефте- и газопроводов, прокладке дорог и железнодорожных путей. Варианты исполнений МРК могут предусматривать их размещение на автомобильном шасси или в грузовых транспортируемых контейнерах.

Отличительными факторами МРК, по сравнению со стационарными мастерскими, являются ограниченные геометрические размеры и отсутствие возможности подключения к промышленной инфраструктуре (сетям водо- и электроснабжения, подачи сжатого воздуха, инертных газов и вакуума). Изготовление в полевых условиях деталей с возможностью их монтажа взамен оригинальных, вышедших из строя, является важной задачей для обеспечения непрерывности технологических процессов. Решение этой задачи может быть достигнуто путем использования в МРК аддитивных технологий, то есть оборудования для 3D-печати.

Краткий обзор существующих мобильных ремонтных комплексов

Выбор технологии 3D-печати определяется в первую очередь используемым материалом: полимер или металл. За рубежом в вопросе создания аддитивных МРК идут по пути создания решений для 3D-печати металлами. При этом технологии печати полимерными материалами (такие как технология FDM/FFF) также используются в составе предлагаемых решений как вспомогательные (быстрое прототипирование, изготовление оснастки и т.п.). В России пока что в подавляющем большинстве аддитивных МРК используется 3D-печать пластиком. Для этого есть ряд причин:

1. Отсутствие в настоящий момент компактного отечественного оборудования для 3D-печати металлом, которое может быть адаптировано под эксплуатацию в мобильном варианте.

2. 3D-принтеры для металла, как правило, имеют большие габариты, либо в принципе не позволяющие разместить их в блок-контейнере или кузове-контейнере, либо не позволяющие разместить их с обеспечением удобного доступа для проведения технического обслуживания оборудования. Установки, использующие технологии SLM (EBM) и DMD для печати металлами, имеющие приемлемые габариты, имеют размеры рабочей области не более 100×100×100 мм, что существенно ограничивает номенклатуру деталей, которые могут быть на них изготовлены.

3. Для полного цикла изготовления металлических изделий с помощью 3D-печати необходимо также использовать крупногабаритное вспомогательное оборудование: чиллеры (водо-воздушные охладители) для лазерных систем (рисунок 1а), взрывозащищенные промышленные пылесосы для удаления металлического порошка (рисунок 1б), вибрационные

сита (рисунок 1в) и вакуумные осушители (рисунок 1г) для вторичного порошка, вакуумные печи для отпуска напечатанных деталей (рисунок 1д).



Рисунок 1—Вспомогательное оборудование для 3D-печати металлом:

а) чиллер лазерной системы; б) вакуумная печь для отпуска напечатанных деталей; в) взрывозащищенный промышленный пылесос для удаления металлического порошка; г) вибрационное сито для вторичного порошка; д) вакуумный осушитель для вторичного порошка

Таблица 1 - Существующие мобильные комплексы аддитивного производства

Наименование	Изготовитель	Страна	Технологии 3D-печати и доп. оборудование
FlexCare System	AddUp Group	Франция	SLM / DMD
Additive Mobile Factory	Fraunhofer IAPT	Германия	WAAM+ЧПУ (фрезерование)
Fusion Factory XS	XERION Berlin Laboratories GmbH	Германия	FDM/Metal FDM
Mobile Repair Factory	METROM Mechatronische Maschinen GmbH	Германия	WAAM +ЧПУ (фрезерование)+3D-сканер
Mobile Smart Factory	Rheinmetall Landsysteme GmbH	Германия	WAAM+ЧПУ (фрезерование) +FDM
Expeditionary Mobile Unit (EMU)	SPEE3D	Австралия	Cold Spray
Phillips Additive Hybrid	Phillips Corp. / Meltio	США/Испания	DMD+ЧПУ (фрезерование)
Expeditionary Fabrication Lab (XFAB)	КМП США	США	FDM +лазерная резка + 3D сканер
Ateliers Numériques Mobiles 4.0	Farm-3D	Франция	FDM
Мобильный комплекс «Плакарт»	АО «Плакарт»	Россия	Газоплазменное напыление (покрытия)
«МАРПАК-П»	ГК «Росатом»	Россия	FDM
КАП-АМ (П)	ООО «Горизонт покрытий»	Россия	FDM+ЧПУ (фрезерование)+3D-сканер

4. При работе с мелкодисперсными металлическими порошками (сырьем для технологий SLM (EBM) и DMD) необходима организация работы персонала в спецодежде, а значит необходимо предусмотреть размещение в мобильном комплексе гардероба и утилизационного отсека для использованных костюмов, масок и перчаток.

Исходя из вышеизложенного, 3D-печать металлом в рамках МРК на сегодняшний день нецелесообразна (по крайней мере, с использованием наиболее распространенных технологий SLM (EBM) и DMD). Поэтому в дальнейшем рассматривается возможность использования в МРК 3D-печати пластиком.

В настоящее время в России и за рубежом уже существует [4, 5] целый ряд мобильных комплексов аддитивного производства, данные по которым сведены в таблицу 1.

Как следует из таблицы, возможности российских мобильных ремонтных комплексов существенно отстают от зарубежных аналогов.

Требования к оборудованию 3D-печати

3D-принтеры в составе МРК должны соответствовать общим требованиям к конструктивным и программно-аппаратным решениям [6] и должны обеспечивать:

- возможность проведения всех необходимых проверок, настроек и регулировок при монтаже, наладке и испытаниях оборудования, предусмотренных технической документацией;

- возможность визуального наблюдения за процессом изготовления в режиме реального времени на всей площади поверхности изготовления;

- автоматическую запись и хранение показаний контрольно-измерительных приборов и средств автоматики (регистрацию данных технологического процесса изготовления, в том числе данных системы мониторинга);

- автоматическую диагностику элементов оборудования, встроенных контрольно-измерительных приборов и средств автоматики;

- ремонтопригодность оборудования, в том числе проведение технического обслуживания и ремонта без нарушений требований безопасности;

- сохранность информации при отсутствии внешнего питания (энергонезависимую память);

- наличие и автоматическое срабатывание основных и (или) резервных аварийных систем, а также наличие систем автоматических блокировок и сигнализаций для обеспечения безопасной работы оборудования.

Кроме того, пунктом 7.3 ГОСТ Р 57588–2021 определен перечень показателей, характеристик и требований, которому должны соответствовать 3D-принтеры. Соответствие каждого 3D-принтера, используемого в России, перечисленным требованиям должно в обязательном порядке быть подтверждено сертификатами качества. Сертифицированы должны быть и материалы для аддитивной технологии, что в настоящее время не обеспечено.

Кроме того, в указанном выше ГОСТ требования к оборудованию 3D-печати, в числе прочей аппаратуры, по устойчивости к внешним воздействующим факторам при транспортировании и эксплуатации по ГОСТ 17516.1-90 и ГОСТ 15543.1-89, по мнению авторов, устарели и нуждаются в актуализации в части ужесточения требований с учетом специфики полевых условий работы МРК.

Оборудование существующих отечественных аддитивных МРК относят к категории экструзии материалов, под которой понимается [7] процесс аддитивного производства, в котором материал выборочно подается через сопло или жиклер. Схема данного процесса [8] представлена на рисунке 2.

Категория «экструзия материала» включает в себя несколько вариантов реализации технологии: *FDM* (*Fused Deposition Modeling*)/*FFF* (*Fused Filament Fabrication*) – моделирование послойным наплавлением/экструзия нити термопластичного полимерного материала и *FGF* (*Fused Granular Fabrication*) – экструзия гранул термопластичного полимерного материала. В данной статье рассматривается технология *FDM/FFF* как наиболее распространенная для термопластиков.

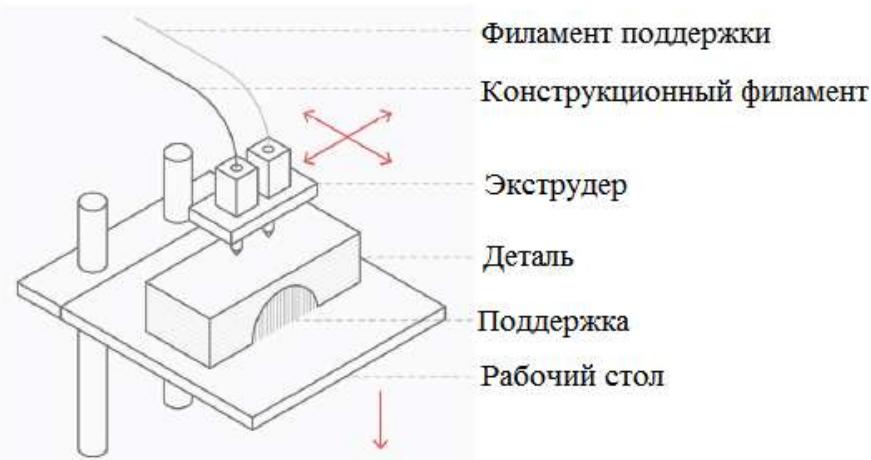


Рисунок 2 – Схема рабочей области оборудования для реализации процесса экструзии

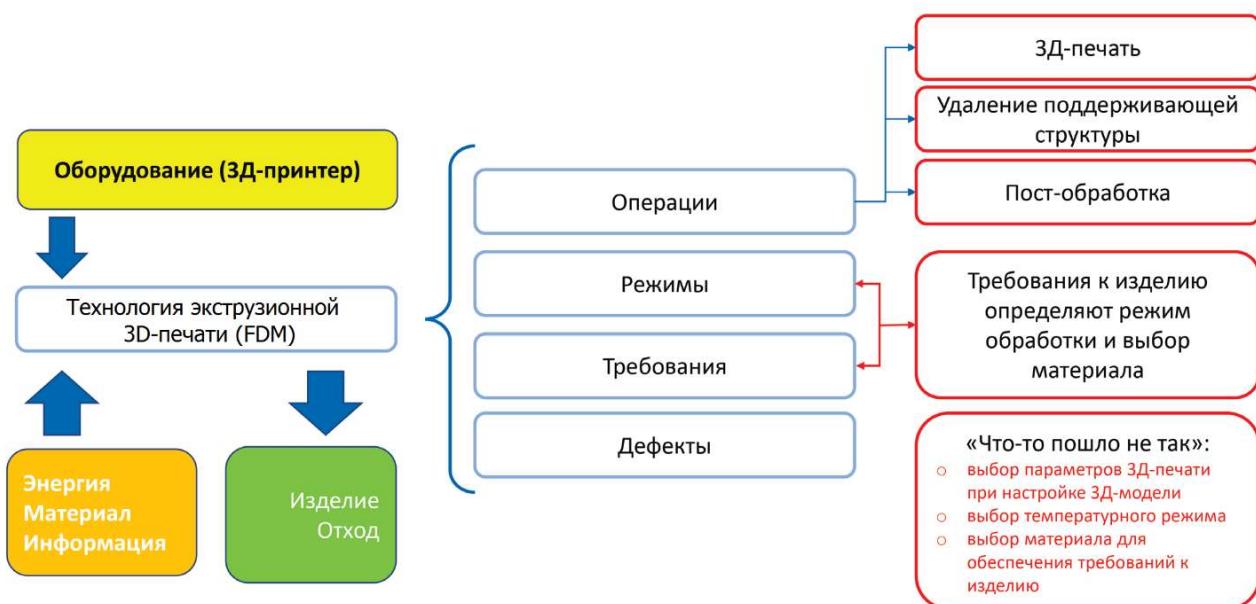


Рисунок 3 – Общая схема технологического процесса FDM-печати

Принцип работы FDM-установок заключается в плавлении пластиковой нити (филамента) и нанесении микрокапель расплавленного термопластика с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования. Пластиковая нить разматывается с катушки и подается в экструдер – устройство, оснащенное механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для плавки материала и соплом, через которое осуществляется собственно экструзия.

Нагревательный элемент служит для нагревания сопла, которое, в свою очередь, плавит пластиковую нить и подает расплавленный материал на формируемое изделие. Верхняя часть сопла при этом, как правило, охлаждается с помощью вентилятора для создания резкого градиента температур, необходимого для обеспечения плавной подачи материала. Принцип формирования самого изделия в данной технологии основан на нагреве термопластичного материала до температуры, начиная с которой материал переходит в вязкотекучее состояние, при этом температура 3D-печати не должна превышать температуру деградации материала.

Прецизионные приводы осуществляют относительное перемещение экструдера (также называемого печатающей головкой) и/или подогреваемой платформы в трех плоскостях. Деталь при этом выращивается снизу-вверх. При печати нависающих элементов формируются поддерживающие структуры либо из материала печати, либо из специального материала поддержек, подаваемого через вспомогательный экструдер.

Сырьем (материалом) для 3D-принтеров мобильных комплексов являются полимерные термопласти, механизмом связи – термическая реакция связывания, источником активации – тепловая энергия. Особенностью термопластиков является возможность их плавить с последующим отвердеванием с сохранением свойств.

Процесс экструзионной 3D-печати может требовать удаления поддерживающих структур и дополнительной постобработки детали после печати. Общая схема технологического процесса технологического процесса *FDM*-печати приведена на рисунке 3.

Послойное выращивание по *FDM*-технологии имеет особенности, которые необходимо учитывать для получения необходимого качества конечного изделия. На качество конечного изделия влияют следующие физические процессы:

1. Эффекты, сопровождающие отверждение материалов (неравномерное остывание, вязкоупругое поведение материалов, гравитационные эффекты, кинетика кристаллизации, усадка, остаточные напряжения в слоях).
2. Ориентация волокна и направления течения материалов (текущее вязкого материала, направление течения и ориентация волокна зависят друг от друга).
3. Формирование связей (влияние температуры волокна на поверхностное натяжение и образование шейки (утонения), эффект кристаллизации).
4. Направление и скорость перемещения печатающей головки.

Таким образом, возможные режимы печати 3D-принтера (скорость, температура камеры и сопла печатающей головки и т.д.), и свойства материалов, которые могут быть использованы для печати, определяют качественные характеристики принтера и, в конечном итоге, – качество конечного изделия. Основные параметры, влияющие на результат печати [9] представлены на рисунке 4.

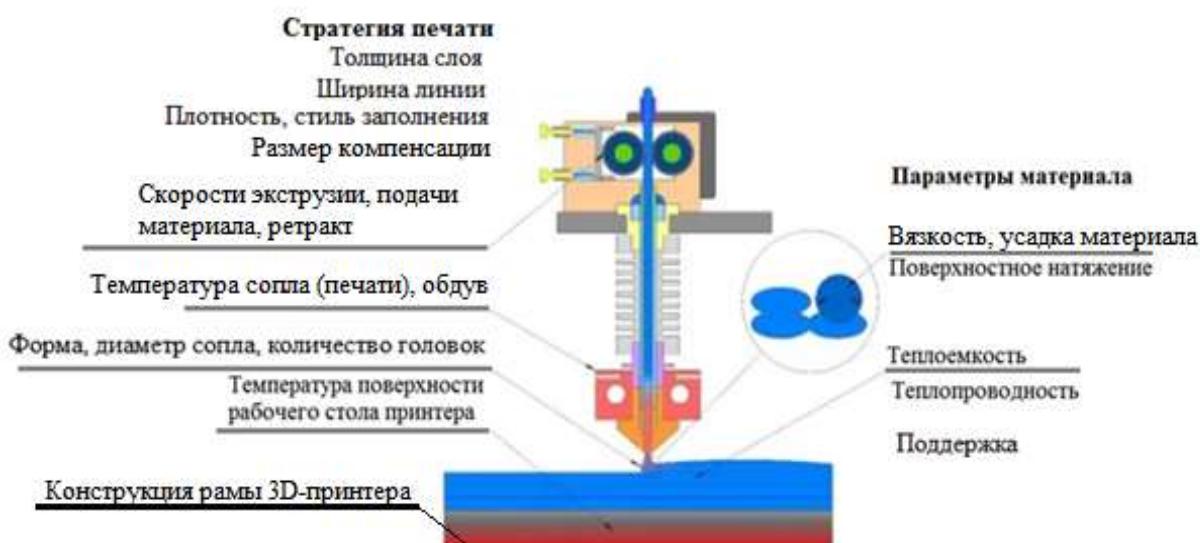


Рисунок 4 – Основные параметры, влияющие на качество печати

Для получения качественного изделия, изготовленного по экструзионной аддитивной технологии, необходим не только подбор материала и знание его свойств как до, так и после 3D-печати, но также и настройка режима 3D-печати. Неправильно заданный режим 3D-печати приводит к формированию дефектов, например, микропустот между соседними слоями. Наличие таких микропустот приводит к снижению прочности изделия.

В зависимости от температуры стеклования материала может меняться минимальная температура нагрева сопла для 3D-печати. Предел повышения температуры сопла определяется началом деградации полимерного материала.

Выбор температуры обработки определяется химическим составом термопластичного материала и требуемыми физико-механическими свойствами, которые необходимо сформировать в материале.

Следует отметить, что в научных публикациях [9-12] достаточно полно раскрыты наиболее часто встречающиеся в практике дефекты печати и даны рекомендации по их

устранению или предупреждению, в [13] приведены рекомендации по устранению выявленных проблем печати. Стандартизованы методы испытаний для контроля качества выпускаемых из пластика изделий [14].

Анализ возможностей мобильных ремонтных комплексов по обеспечению качества изготавливаемых изделий

Для анализа свойств изделий, полученных с помощью аддитивных технологий (микроструктуры, состава и свойств материалов) требуется специальное лабораторное и исследовательское оборудование. На основании результатов анализа подбираются технологии производства изделий и их обработки. Указанным оборудованием могут оснащаться службы качества крупных предприятий для контроля качества серийно изготавливаемых деталей.

Техническое оснащение современных отечественных МРК предназначено для единичного изготовления деталей, взамен вышедших из строя, в строго регламентированное время, чтобы исключить длительный простой оборудования. Оценка физико-механических свойств полученных изделий, как правило, не проводится, а имеющееся в комплексах контрольно-измерительное оборудование позволяет оценить качество печати в объеме оценки соответствия геометрических размеров изделия заданным требованиям и устранить обнаруженные отклонения инструментами постобработки.

При этом изготавливаемые детали по условиям эксплуатации могут подвергаться различным динамическим или статическим нагрузкам, резким температурным перепадам, воздействиям агрессивных сред и т.д.

Оценить их пригодность после изготовления для монтажа на промышленное оборудование в условиях МРК невозможно (за исключением, как было сказано выше, соответствия геометрических размеров). В этом отношении необходимо пользоваться рекомендациями изготовителя оригинальной детали, которую требуется заменить деталью 3D-печати, в части используемого материала и режима печати. При этом следует иметь ввиду особенность аддитивных технологий – печать партии изделий на разных принтерах даже при их одинаковых настройках не всегда обеспечивает схожесть свойств всей партии.

Если такие рекомендации получить невозможно, то следует провести апробацию – оценку возможности использования распечатанной детали в условиях реальной эксплуатации, установив деталь в определенное конструкторской документацией место.

На практике оператор в лучшем случае только предполагает, какими качествами будет обладать это изделие и его изготовление идет путем «проб и ошибок». Так, например, выбор термополиуретанов (используемых как замена каучуков) для изготовления прокладок в моторных установках должен предполагать их масло- или бензостойкость, а также устойчивость к высоким и низким температурам. Немаловажным фактором является ресурс изготавливаемого изделия при работе, например, в условиях агрессивных сред или высоких ударных нагрузок. И в этом случае оператор после изготовления должен понимать – пригодно ли изделие к применению по назначению. Бездумное использование оператором материалов для изготовления изделий может в конечном счете нанести непоправимый ущерб тому агрегату, в котором это изделие будет применено.

Как известно, любая оригинальная деталь или узел выпускаются на заводе-изготовителе по Техническим условиям (ТУ), в которых определены основные технические характеристики, которыми должна обладать эта деталь, а также методы испытаний для оценки этих характеристик. На проверку соответствия детали ТУ направлена работа отдела технического контроля (ОТК) на заводах-изготовителях, которые принимают готовую продукцию. Такой подход обеспечивает надежность и безопасность эксплуатации оборудования.

Сложно представить, что изготовленный в МРК аналог оригинальной детали или узла в условиях единичного производства может быть качественнее самого оригинала, изготовленного в заводских условиях. Однако, как временная мера в части замены аналогом оригинала с целью избежать простоя оборудования в отсутствие требуемой запчасти – вполне допустимо. И вопрос заключается лишь в допустимости такой замены, чтобы использование изготовленного в мастерской аналога не привело к более масштабным негативным последствиям – выходу из других узлов ремонтируемого оборудования.

Обоснование вопросов формирования базы данных изготавливаемых деталей

В целом, целесообразно для каждого мобильного комплекса, исходя из его назначения, разработать перечень деталей (базу данных), которые могут быть изготовлены в полевых условиях, уделив особое внимание деталям, влияющим на работоспособность оборудования, в состав которого они входят.

Представляется целесообразным включение в базу данных не только 3D-моделей деталей, но и всей необходимой технологической информации – марка материала, настройки печати (температура сопла, температура подогрева, коэффициент заполнения, максимальная скорость перемещения экструдера и т.д.), указания для препроцессинга (настройки слайсера, размещение модели), указания для последующей постобработки и т.п. Если принтеры, принятые в состав аддитивного комплекса, поддерживают загрузку настроек печати из файла, то в базе должны храниться готовые файлы настроек.

Хотя для подготовки 3D-печати обычно используется формат STL (фасеточный формат геометрии), 3D-модели в базе предпочтительно хранить в аналитическом формате, например, STEP. Это позволит, при необходимости, легко вносить изменения в 3D-модель (например, если необходимо изготовление детали в другом исполнении, отсутствующем в базе). Перед началом подготовки к печати 3D-модели в аналитическом формате можно преобразовать в STL с нужной степенью точности, в соответствии с параметрами используемого 3D-принтера.

База 3D-моделей может состоять из двух частей – оффлайновой, хранящейся на машинных носителях информации в составе аддитивного комплекса, и онлайновой. Оффлайновая часть должна содержать самые востребованные 3D-модели, выбранные на основе анализа статистики использования аддитивных технологий в ремонте оборудования. В этом случае будет обеспечена максимальная автономность аддитивного комплекса. Онлайновая часть будет содержать все остальные модели, которые при необходимости могут подгружаться по доступным каналам связи. Наличие онлайновой части позволит оперативно вносить изменения в базу.

При этом детали, внесенные в рассматриваемую базу, должны быть апробированы в условиях их реального применения и иметь достаточный (заданный) эксплуатационный ресурс.

В вопросах допустимости замены оригинальной детали ее аналогом, изготовленной в мобильном ремонтном комплексе, возможно, следует учесть опыт, существующий в пионерируемой авиации [15], когда детали разделены на критические (влияющие на безопасность полетов) и некритические (на безопасность полетов влияния не оказывающие). Это, по нашему мнению, поможет исключить гораздо больший ущерб для ремонтируемого оборудования от использования неоригинальной детали, чем простой этого оборудования в ожидании оригинальной запчасти. При этом для обеспечения возможности установки аналогов деталей взамен оригинальной, изготовленной в МРК, видимо необходима разработка новой нормативной документации, в которой будут оговорены условия возможности такой замены. Разрабатываемая нормативная документация должна описывать требования к таким деталям, процессу их изготовления, контролю качества и испытаниям.

Кроме того, указанная документация должна требовать строгого соблюдения условий изготовления деталей с использованием аддитивных технологий. Это, в свою очередь, определит требования к контрольно-измерительному и испытательному оборудованию аддитивного МРК.

Обязательным условием возможности изготовления детали с заданными свойствами и стабильным качеством является стандартизация и сертификация оборудования 3D-печати, используемых материалов, а также технологии изготовления.

В настоящее время в области аддитивных технологий принято 53 стандарта, при этом в них отсутствуют:

- требования к периодичности проверки соответствия характеристик оборудования 3D-печати при его использовании;
- классификация оборудования 3D-печати по степени точности и качеству изготовления деталей;
- стандартизованные требования к методам испытаний продукции, изготавливаемой с использованием аддитивных технологий;

- единые требования к свойствам материалов, используемых для 3D-печати.

Необходимо восполнение пробела в области стандартизации как процессов аддитивной печати, так и в области используемого оборудования, в том числе путем гармонизации отечественных стандартов с зарубежными.

Примером удачного использования аддитивной печати при полевом ремонте может служить 3D-принтер «Муромец Р200» [16], изготовленный на базе коммерческого принтера *Hercules G3*, предназначенный для работы с различными типами полимеров, в том числе гибких и высокотемпературных. Данный принтер используется в мобильных ремонтных мастерских для оперативного ремонта автомобильной техники, и применяется, в первую очередь, для печати эластичных деталей – прокладок, манжет, сальников, уплотнений (рисунок 5).

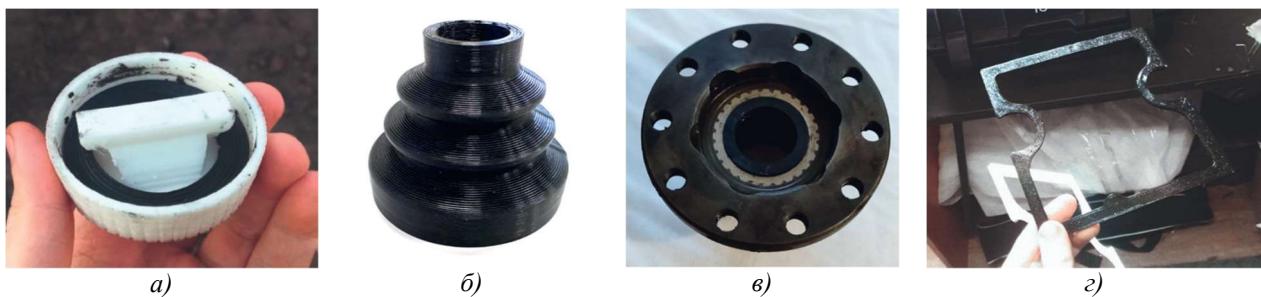


Рисунок 5 – Образцы изготовленных 3D-принтером «Муромец Р-200» деталей автомобильной техники:

а) крышка маслозаливной горловины автомобиля «КАМАЗ» (ABS-PA) с прокладкой (TPU D70); б) защитный чехол рычага коробки переключения передач автомобиля «УАЗ-469» (TPU A70); в) кольца уплотнительные для конической передачи (TPU D55); г) прокладки клапанной крышки автомобиля «КАМАЗ» (TPU A70)

В этих МРК могут изготавливаться изделия самого разного назначения и, ввиду этого, к ним могут предъявляться разные требования по физико-механическим характеристикам. Для этого в данном мобильном комплексе используются термопластичные полиуретаны с различным набором свойств и характеристик. По данным белорусской компании «Пластик-Техноджиз» [17], термополиуретаны (TPU) могут рассматриваться как заменители резин разного типа (хлоропреновый каучук, акрилонитрил-бутадиеновый каучук, этиленпропилендиеновый каучук, эпихлоргидриновый каучук, бутадиен-стирольный каучук, натуральный каучук).

Изделия, которые изготавливаются из термополиуретана обладают необходимой твердостью по Шору, маслобензостойкостью, термостойкостью, что существенно для тех мест конструкций, где температура кратковременно может достигать 120°C. При этом, как заявляли разработчики принтера «Муромец Р200», изначально вся эта концепция не была направлена на замещение оригинальных запчастей, речь шла только об оперативном ремонте в полевых условиях.

Полтора года у разработчиков ушло на апробацию и опытную эксплуатацию МРК, в ходе которой в 98% случаев было подтверждено соответствие изготовленной детали требуемому ресурсу. Работа по выявлению возможных проблем продолжается и по сей день.

Опыт показывает, что для узла с десятью различными уплотнениями из полимерных деталей, которые можно изготовить методом полимерной FDM-печати, невозможно подобрать один материал для всех десяти деталей ввиду широкого спектра требований. Необходима высокая термостойкость, эластичность. Важна и морозостойкость до минус 70°C, хотя требования ограничиваются порогом в минус 50°C. Но если мы говорим о перспективах развития ремонта в самых разных регионах страны, включая Заполярье, где логистика еще более сложна и требования к материалам еще строги, рассмотренные проблемы требуют решения.

Вопросами дальнейших исследований являются анализ и разработка рекомендаций по выбору для перспективных мобильных ремонтно-производственных комплексов конкретных моделей 3D-принтеров, 3D-сканеров, а также специализированного программного обеспечения.

Заключение

Проведен анализ технических характеристик зарубежных и отечественных образцов мобильных ремонтных аддитивных комплексов. Сформулированы требования, которым должно отвечать оборудование 3D-печати, рассмотрены вопросы обеспечения качества изготавливаемых в ходе аддитивной печати деталей, а также создание электронной базы 3D-моделей деталей. Учитывая перспективность применения аддитивных технологий и обобщив зарубежный и отечественный опыт эксплуатации подобных комплексов, следует разработать и изготовить несколько опытных образцов-концептов для 3D-печати пластиком и апробировать их в условиях реальной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маев С.А. Под знаменем ремонта // Военно-промышленный курьер. 2016. № 37. С. 4-5.
2. Жернаков П.Б., Цыбин С.М. Особенности внедрения аддитивных технологий в систему войскового ремонта // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 6. С. 316-320.
3. Степанов В.П., Сафин А.М., Карпенко О.Н., Трофимчук М.В. Войсковой ремонт в системе технической эксплуатации на современном этапе развития авиационной техники // Эксплуатация и восстановление вооружения и военной техники, техническое обеспечение «Воздушно-космические силы. Теория и практика». 2020. № 16. С. 238-245.
4. Берюхов А. Мобильные комплексы аддитивного производства: обзор рынка, опыт внедрения, концепция мобильной фабрики // Аддитивные технологии. № 4, 2023. С. 18-21.
5. Сергеев В.В., Кровяков В.Б., Степанов Р.Н., Рубцов В.А. Проблемные вопросы формирования технического облика перспективного аддитивного комплекса для войскового ремонта авиационной техники. // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2024. № 31. С. 87–102. [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.vva.mil.ru/Izdaniay/VKS-teoriya-i-praktika> (дата обращения 21.04.2025).
6. ГОСТ Р 57588-2021 Аддитивные технологии. Оборудование для аддитивных технологических процессов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2021. – 12 с.
7. ГОСТР 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. – 16 с.
8. Кинжагулов И.Ю., Колганов О.А., Попов Г.Д., Аддитивные технологии в цифровом производстве – СПб: Университет ИТМО, 2024. – 58 с.
9. От чего зависит точность печати [Электронный ресурс] URL: <https://lider-3d.ru/blog/stati/ot-chego-zavisit-tochnost-3d-pechati> (дата обращения: 12.01.2025).
10. Бен Рэдвуд, Филемон Шофер, Брайан Гаррэт. 3D-печать. Практическое руководство / пер. с англ. М. А. Райтмана. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 220 с.
11. Проблемы качества 3D-печати [Электронный ресурс] URL: <https://www.simplify3d.com/> (дата обращения: 21.09.2024).
12. Руководство по устранению распространенных проблем 3D-печати [Электронный ресурс] URL: <https://3d-diy.ru/blog/rukovodstvo-ustraneniyu-problem-3d-pechatи/> (дата обращения: 20.09.2024).
13. 3D-печать: основные проблемы и способы их устранения. [Электронный ресурс] URL: <https://top3dshop.ru/wiki/3d-print-main-problems-and-solutions.html>. (дата обращения: 13.12.2024).
14. ГОСТ Р 57587- 2017 Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования. Методы контроля и испытаний. М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.
15. Авиационные правила. Часть 27. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов нормальной категории. – М.: ОАО «Авиаиздат», 2014. – 124 с.
16. Квадрига успеха «Импринты». // Аддитивные технологии. № 3, 2024. С. 4-7.
17. Термопластичные эластомеры. [Электронный ресурс]. URL: <https://ptl.by/index.pl?act=PRODUCT&id=50>. (дата обращения: 18.10.2024).

Панамарев Геннадий Евгеньевич
Федеральное государственное
автономное учреждение «Военный
инновационный технополис «ЭРА»
Доктор технических наук, доцент,
старший научный сотрудник
научно-исследовательского отдела,
353456, Краснодарский край, г.
Анапа, Пионерский пр-т, 41
Тел. +7(495)693-30-99 (доп. 25-62)
Email: era_otd1@mil.ru

Ляскин Антон Сергеевич
Федеральное государственное
автономное учреждение
«Военный инновационный
технополис «ЭРА»
Кандидат технических наук,
доцент, старший научный
сотрудник научно-
исследовательского отдела,
353456, Краснодарский край, г.
Анапа, Пионерский пр-т, 41
Тел. 8 918-948-39-60
Email: alyskin@mail.ru

Ефремов Александр Васильевич
Федеральное государственное
автономное учреждение «Военный
инновационный технополис «ЭРА»
Кандидат технических наук,
научный сотрудник научно-
исследовательского отдела
Тел. 8 918-581-41-13
Email: efremov55alex@gmail.com

ESTIMATION OF ADDITIVE MOBILE UNITS CAPABILITIES FOR FIELD REPAIRS

Abstract. Russian and foreign additive mobile units and additive equipment were analyzed. Noted that existing domestic units are intended for using polymers for 3D printing. 3D printing quality and causes of 3D printing faults are considered. Capabilities for field estimation of 3D printing quality and possible problems of such estimation are analyzed. Guidelines for using 3D printed parts for field repairs instead of traditionally manufactured originals are proposed.

Keywords: additive technologies, 3D printing, filament, mobile repair unit.

BIBLIOGRAPHY

1. Maev S.A. Under the Banner of Repair // Military-Industrial Courier. 2016. No. 37. pp. 4-5.
2. Zhernakov P.B., Tsybin S.M. Features of the Implementation of Additive Technologies in the Troop Repair System // Bulletin of Tula State University. Technical Sciences. 2017. Issue 6. pp. 316-320.
3. Stepanov V.P., Safin A.M., Karpenko O.N., Trofimchuk M.V. Troop Repair in the Technical Operation System at the Current Stage of Aviation Technology Development // Operation and Restoration of Weapons and Military Equipment, Technical Support "Aerospace Forces. Theory and Practice". 2020. No. 16. pp. 238-245.
4. Beryukhov A. Mobile additive manufacturing complexes: market review, implementation experience, mobile factory concept // Additive technologies. No. 4, 2023. pp. 18-21.
5. Sergeev V.V., Krovayakov V.B., Stepanov R.N., Rubtsov V.A. Problematic issues of forming the technical appearance of a promising additive complex for military repair of aircraft // Aerospace Forces. Theory and Practice. 2024. No. 31. pp. 87-102. [Electronic resource]. Access mode <https://www.vva.mil.ru/Izdaniay/VKS-teoriya-i-praktika> (date of access 04/21/2025).
6. GOST R 57588-2021 Additive technologies. Equipment for additive technological processes. General Requirements. Moscow: Standartinform, 2021. – 12 p.
7. GOST R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Additive Manufacturing Processes. Basic Principles. Part 1. Terms and Definitions. Moscow: Standartinform, 2017. – 16 p.
8. Kinzhagulov I.Yu., Kolganov O.A., Popov G.D., Additive Technologies in Digital Production – St. Petersburg: ITMO University, 2024. – 58 p.
9. What Depends on Printing Accuracy [Electronic resource] URL: <https://lider-3d.ru/blog/stati/ot-chego-zavisit-tochnost-3d-pechatyi>. (Accessed: 12.01.2025).
10. Ben Redwood, Philemon Schofer, Brian Garrett. 3D Printing: A Practical Guide / translated from English by M. A. Reitman. Moscow: DMK Press, 2020. – 220 p.
11. 3D Printing Quality Issues [Electronic resource] URL: <https://www.simplify3d.com/> (accessed: 09/21/2024).
12. A Guide to Troubleshooting Common 3D Printing Problems [Electronic resource] URL: <https://3d-diy.ru/blog/rukovodstvo-ustraneniyu-problem-3d-pechatyi/> (accessed: 09/20/2024).
13. 3D Printing: Main Problems and How to Solve Them. [Electronic resource] URL: <https://top3dshop.ru/wiki/3d-print-main-problems-and-solutions.html>. (Accessed: 13.12.2024).
14. GOST R 57587-2017. Products Obtained by Additive Manufacturing Processes. General Requirements. Inspection and Testing Methods. Moscow: Standartinform, 2017. – 12 p.
15. Aviation Regulations. Part 27. Airworthiness Standards for Normal Category Rotorcraft. Moscow: OJSC Aviaizdat, 2014. – 124 p.
16. Quadriga of Success "Imprints". // Additive Technologies. No. 3, 2024. pp. 4-7.
17. Thermoplastic Elastomers. [Electronic resource]. URL: <https://ptl.by/index.pl?act=PRODUCT&id=50>. (Accessed: 18.10.2024).

Panamarev Gennady Evgenievich

doctor of technical sciences, associate professor, senior researcher, research department, era_otd1@mil.ru, Federal State Autonomous Institution «Military Innovative Technopolis «ERA», Russia, Anapa

Lyaskin Anton Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor, senior researcher, research department, era_otd1@mil.ru, Federal State Autonomous Institution «Military Innovative Technopolis «ERA», Russia, Anapa

Efremov Aleksandr Vasilievich

candidate of technical sciences, associate researcher, research department, era_otd1@mil.ru, Federal State Autonomous Institution «Military Innovative Technopolis «ERA», Russia, Anapa

БАРСУКОВ Г.В., КОЖУС О.Г., ЗАБРОДА С.В., САФРОНОВ Д.П., КРЫГИНА Е.П.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КОМПАУНД-ПРОТЕКТОРА НА АБРАЗИВЕ ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ ПОД ВОДОЙ

Аннотация. Авторами статьи представлены результаты теоретического исследования прочности соединения полимерной оболочки с абразивом из условия, что дефект покрытия формируется на участке контакта, где энергия взаимодействия имеет минимальное значение. Установлено, что слабая адгезия и недостаточный уровень поверхностной энергии гидрофобного полимера приводят к несплошности контакта компаунд-протектора на поверхности абразива. Рекомендуется метод повышения поверхностной энергии и адгезии поверхности абразива перед нанесением компаунд-протектора.

Ключевые слова: абразив, гидроабразивное резание, компаунд-протектор, оболочка, покрытие, энергия адгезии, полимер.

Введение

В настоящее время наблюдается всплеск интереса к гидроабразивному резанию (ГАР) как к передовой технологии обработки материалов. Основная причина такого интереса связана расширением сфер ее применения, благодаря универсальности и уникальности процесса [1]. Данная технология может эффективно применяться для работ под водой, например, для фрагментирования затонувшей техники (летательных аппаратов и судов) с целью последующего подъема их частей, обслуживания техногенно-опасных объектов (газо- и нефтепроводов). Технологию гидроабразивного резания можно эффективно применить для развития аварийно-спасательной инфраструктуры в Арктической зоне, что соответствует «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года».

Разрезание и разрушение затонувшего судна на большой глубине - важный этап спасательных работ. Особенно в случае с глубоководным затонувшим судном, на борту которого находилось топливо и опасные жидкые химические вещества. Безопасное и эффективное разрезание и вскрытие корпуса является основным процессом для удаления опасной жидкости с затонувшего судна.

Развитие технологии ГАР для подводной резки в условиях Арктики требует серьезной научной адаптации из-за специфики использования в затопленном состоянии, а ее практическое применение выдвигает специфические требования к системе подачи воды и абразива, параметрам соплового блока и другим. Для резания под водой на большой глубине применяют насосы, работающие в морской воде, устройства для движения сопла оснащают подшипниками, смазываемые окружающей жидкостью, а для управления смешиванием абразива с водой устанавливают специальные клапанные устройства [2].

Подводную гидроабразивную резку осуществляют, как правило, мобильные установки. Для резания под водой такие устройства оснащают встроенным струйно-формирующим трактом, состоящим из алмазного сопла, дополнительной переходной трубки и стандартной фокусирующей трубки [3].

Одной из серьезных проблем является износ сопла в процессе резания под водой. С одной стороны, частая смена сопла затруднена в тяжелых условиях, с другой стороны, увеличение размера отверстия канала сопла приводит к снижению давления и эффективности резки [4].

Влияние размера абразива, диаметра отверстия и фокусной длины на износ сопла было исследовано во многих исследованиях [5, 6]. Hashish M. определил влияние материалов смесительной трубки на износ выходного диаметра сопла. Были выявлены различные типы износа (как поперечного, так и осевого) [7] и обнаружены тенденции износа вдоль сопла. Hashish M. указал, что свойства материала сопла должны меняться от высокой прочности на входе до высокой твердости на выходе, поскольку «механизмы износа вдоль смесительной трубки изменяются от эрозии до абразивного износа на участках ниже по фокусирующей струе трубке».

Однако решить проблему значительного продления срока службы сопла за счет применения высокопрочных материалов и оптимальной геометрии каналов внутреннего тракта соплового устройства не удалось. Так Грег А. Морт [8] в своем исследовании установили, что срок службы композитных твердосплавных сопел составляет приблизительно 70 часов при резке гранатовым абразивом.

Вместе с тем, несмотря на высокую актуальность современных исследований, связанных с гидроабразивным резанием, не рассматривались вопросы получения нового эффективного композитного абразивного материала. Хотя это направление весьма актуально, так как появляется возможность создать уникальные условия для гидроабразивной резки, когда с одной стороны мы можем сохранить от износа фокусирующую трубку, применив полимерную оболочку, а с другой, значительно повысить режущие возможности гидроабразивной струи за счет использования сверхтвердых абразивов [9].

Однако для его создания недостаточно научных знаний о технологических принципах формирования соединения абразив-полимер и процессах нанесения полимерной оболочки на абразивное зерно, что не позволяет обеспечить требуемую однородность и толщину покрытия, а так же целостность нового композиционного материала в процессе эксплуатации.

При описании и количественной оценке этих явлений существенную роль играет учет адгезионного взаимодействия соединения абразив-полимер. Это особенно важно при изучении прочности композиционных материалов, вопросов развития трещин, трения качения и скольжения упругих тел, как с гладкими, так и с шероховатыми поверхностями, определении параметров технологических процессов.

Таким образом, для гидроабразивного резания под водой к абразиву с полимерным покрытием предъявляются особые требования к свойству покрытия, такие как однородность покрытия, толщина покрытия, пористость оболочки и морфология поверхности, которые зависят от механизмов роста частиц. Нанесение полимерной оболочки путем распыления раствора на абразив в псевдоожженном слое является одним из основных методов для нанесения покрытий на частицы [10, 11]. Полимерный раствор для покрытия распыляется на псевдоожженные частицы, капли высыхают и оседают на поверхности частиц, образуя «послойный» рост в условиях сбалансированной псевдоожженности и сушки [12].

На свойства и качество частиц с полимерным покрытием влияет множество параметров, в том числе свойства абразива и полимера, рабочие параметры и геометрия камеры оборудования для псевдоожжения. Сочетание различных факторов оказывает большое влияние на эффективность процесса нанесения покрытия [13]. При определенных условиях может наблюдаться несплошность покрытия абразивных частиц, их агломерация или пересушивание [14].

Кроме того, неравномерность адгезионной связи полимера с поверхностью абразива приводит к отслаиванию покрытия. Этот эффект определяет прерывистый характер роста оболочки и увеличение шероховатости поверхности полимерного компаунд-протектора и, как следствие, развитие пористости покрытия. Таким образом, дефекты покрытия частицы возникают при низкой энергии взаимодействия раствора полимера с поверхностью абразива, когда капли скапливаются и кристаллизуются, образуя выпуклости и острова. Поэтому необходимым условием для выполнения защитных функций компаунд-протектора на абразиве является однородность и сплошность покрытия.

В связи с этим данная статья посвящена получению теоретических выражений для оценки поврежденности адгезионного контакта полимерной оболочки с абразивом по значению их энергии взаимодействия.

Основная часть

Прочное соединение полимерного покрытия на абразиве обусловлено непрерывностью их атомных структур, при которой атомная структура одного материала переходит в структуру другого. В таких случаях становится очевидной согласованность кристаллических решеток соприкасающихся тел. Нарушение согласованности атомной структуры в области $S_{1-\alpha} \equiv S_{\beta} \subset S_{(12)}$ указывает на то, что в данном месте отсутствует устойчивое сцепление

(рисунок 1). Поля перемещений и напряжений, формирующиеся вокруг дефектного участка S_β на контактной поверхности полимерной оболочки с абразивом $B_{(j)}$, могут отличаться в зависимости от природы дефектов, образовавшихся вдоль границ дефекта S_β .

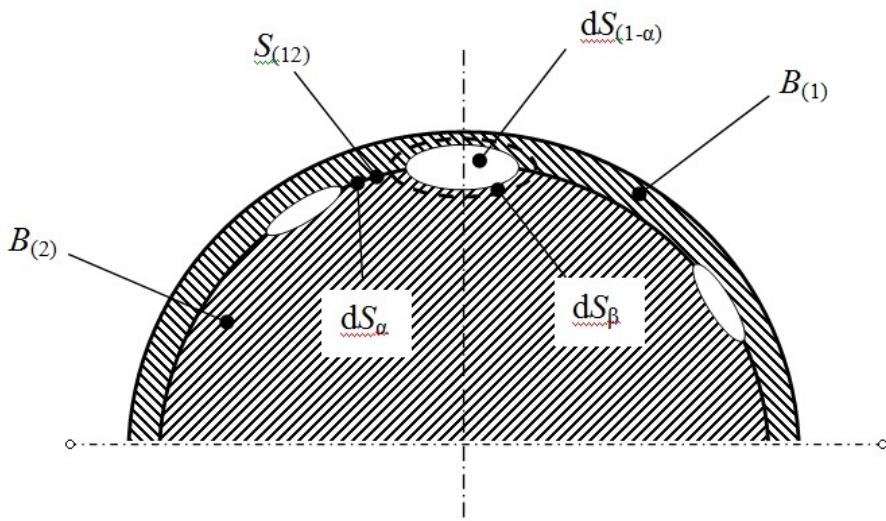


Рисунок 1 – Схема адгезионного контакта полимерной оболочки с абразивом при наличии дефектов покрытия

Выделим на каждом малом участке $dS_{(12)}$ области соприкосновения полимерной оболочки с абразивом участок прочного контакта $S_{(12)}$, имеющий площадь $dS_{\alpha(12)}$ и дефектный участок $dS_{1-\alpha} \equiv dS_\beta$:

$$dS_{(12)} = dS_\alpha + dS_\beta = \alpha dS_{(12)} + \beta dS_{(12)}. \quad (1)$$

В зонах dS_α и dS_β , характер адгезионной связи оболочки и абразива неодинаков. На участках dS_α и dS_β элементарные перемещения $\vec{u}_{\alpha(j)}$ и $\vec{u}_{\beta(j)}$ не связаны друг с другом и описываются независимо следующим выражением:

$$(\vec{u}_{\alpha(j)}, \vec{u}_{\beta(j)}) \begin{cases} \neq 0, \vec{r} \in S_\alpha, S_\beta \\ = 0, \vec{r} \in S_\beta, S_\alpha \end{cases}. \quad (2)$$

Откуда, для малого участка соприкосновения оболочки с абразивом $dS_{(12)}$ запишем выражение, определяющее средние перемещение по нему $\vec{u}_{(j)}$:

$$\vec{u}_{(j)} = \alpha \vec{u}_{\alpha(j)} + \beta \vec{u}_{\beta(j)} = (1 - \beta) \vec{u}_{\alpha(j)} + \beta \vec{u}_{\beta(j)}. \quad (3)$$

Взаимосвязь между объемными величинами перемещений частиц оболочки и абразива в области их контакта $B_{(j)}$ характеризуется как непрерывная и гладкая, позволяющая осуществлять переход к поверхностным значениям $S_{(j)}$ и, наоборот, от $S_{(j)}$ к $B_{(j)}$. Откуда выражение (3) описывает итоговое распределение полей перемещений в $\vec{u}_{(j)} = \vec{u}_{(j)}(\vec{r})$ по занимаемому объему $V_{(j)}$ контактной поверхностью полимерной оболочки с абразивом $B_{(j)}$. Поле перемещений $\vec{u}_{\alpha(j)}$ возникло из-за воздействия краевого поля $\vec{u}_{\alpha(j)}$ (для случая $\vec{r} \in dS_\alpha$), а поле перемещений $\vec{u}_{\beta(j)}$ (для случая $\vec{r} \in V_{(j)}$) возникает от поля $\vec{u}_{\beta(j)}$ для $\vec{r} \in dS_\beta$.

Условия когерентности решеток, а также ее нарушение предлагаются описать в рамках модели однородных изотропных линейно упругих материалов второго порядка, находящихся в состоянии адгезионного контакта. В этом случае энергия их упругой деформации зависит не только от первых, но и вторых градиентов перемещений. Эти величины являются обобщенными перемещениями в результате работы обобщенных сил, которые определяют два тензора напряжений $P_{(j)}^{(1)}$ и $P_{(j)}^{(2)}$, соответственно второго и третьего рангов.

Примем, что $\vec{u}_{(j)} = \vec{u}_{(j)}(\vec{r})$, $\vec{u}_{\alpha(j)} = \vec{u}_{(j)}(\vec{r})$ и $\vec{u}_{\beta(j)} = \vec{u}_{\beta(j)}(\vec{r})$ ($\vec{r} \in V_{(j)}$), которые характеризуются моделью линейно-упругой изотропной среды. Градиенты перемещений $\nabla \vec{u}_{(j)}$ и $\nabla^2 \vec{u}_{(j)}$ частиц оболочки и абразива в области их контакта $B_{(j)}$ для поля $\vec{u}_{(j)} = \vec{u}_{(j)}(\vec{r})$, позволяют описать разность между фактической потенциальной энергией тела $B = B_{(1)} \cup B_{(2)}$ и её значением в исходном состоянии, как функционал:

$$W_{(12)} = W_{(12)}(\nabla \vec{u}_{(1)}, \nabla \vec{u}_{(2)}, \nabla^2 \vec{u}_{(1)}, \nabla^2 \vec{u}_{(2)}). \quad (4)$$

Запишем выражения для стационарного значения функционала (4):

$$\begin{aligned} \delta(W_{(12)}(\alpha)) &= \sum_{j=1}^2 \int_{V_{(j)}} \delta w_{(j)} dV_{(j)} = \\ &= \sum_{j=1}^2 \int_{V_{(j)}} \left[P_{(j)}^{(1)} \cdot \delta(\nabla \vec{u}_{(j)})^T + P_{(j)}^{(2)} \cdot \delta(\nabla^2 \vec{u}_{(j)})^T \right] = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $w_{(j)}$ – энергия упругих деформаций, обусловленная расхождением значений перемещений в теле $B_{(j)}$;

$$P_{(j)}^{(n)} = \frac{\partial w_{(j)}}{\partial (\nabla^n \vec{u}_{(j)})^T}, \quad (n=1,2) \text{ – тензоры напряжений.}$$

После интегрирования (5) запишем выражения для определения условий равновесия контакта оболочки и абразива $B_{(j)}$, граничных условий в области дефектов покрытия $S_{0(j)} = S_{(j)} \setminus S_{(12)}$, а так же условий связи полей перемещений и напряжений в области соприкосновения оболочки и абразива:

$$\nabla \cdot (P_{(j)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{(j)}^{(2)}) = \vec{0} \quad \vec{r} \in V_{(j)} \quad (6)$$

$$\vec{n}_{(j)} \cdot (P_{(j)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{(j)}^{(2)}) - \nabla_S \cdot (\vec{n}_{(j)} \cdot P_{(j)}^{(2)}) = 0 \quad \vec{r} \in S_{0(j)} \quad (7)$$

$$(\vec{n}_{(j)} \cdot \vec{n}_{(j)}) \cdot P_{(j)}^{(2)} = \vec{0} \quad \vec{r} \in S_{0(j)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} &\int_{S_{(12)}} \left\{ \left[\vec{n}_{(12)} \cdot (P_{(1)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{(1)}^{(2)}) - \nabla_S \cdot (\vec{n}_{(12)} \cdot P_{(1)}^{(2)}) \right] \cdot \delta \vec{u}_{(1)} + \right. \\ &\quad \left. + \left[\vec{n}_{(21)} \cdot (P_{(2)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{(2)}^{(2)}) - \nabla_S \cdot (\vec{n}_{(21)} \cdot P_{(2)}^{(2)}) \right] \cdot \delta \vec{u}_{(2)} \right\} dS_{(12)} + \\ &+ \int_{S_{(12)}} \left\{ \left(\vec{n}_{(12)} \cdot \vec{n}_{(12)} \right) \cdot P_{(1)}^{(2)} \right\} \cdot \delta \left(\frac{\partial \vec{u}_{(1)}}{\partial n_{(12)}} \right) + \\ &+ \left. \left(\left(\vec{n}_{(21)} \cdot \vec{n}_{(21)} \right) \cdot P_{(2)}^{(2)} \right) \cdot \delta \left(\frac{\partial \vec{u}_{(2)}}{\partial n_{(21)}} \right) \right\} dS_{(12)} = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где \vec{n} – единичный вектор;

$$\partial \vec{u} / \partial n = \vec{n} \cdot (\nabla \vec{u});$$

$$\nabla_S – \text{градиент по площади контакта } S.$$

Так как линейные функции градиентов $\nabla \vec{u}_{(j)}$ и $\nabla^2 \vec{u}_{(j)}$ являются тензорами $P_{(j)}^{(1)}$ и $P_{(j)}^{(2)}$ запишем следующее выражение:

$$P_{(j)}^{(n)} = \alpha P_{\alpha(j)}^{(n)} + \beta P_{\beta(j)}^{(n)}, \quad (n=1,2). \quad (10)$$

Согласованность решеток оболочки $B_{(1)}$ и абразива $B_{(2)}$ на участке их адгезионного взаимодействия сохраняется в месте контакта dS_a и при изменении напряженно-деформированного состояния $B = B_{(1)} \cup B_{(2)}$. Поэтому условие сопряжения полей перемещений и напряжений запишем в следующем виде:

$$\delta \vec{u}_{\alpha(1)} = \delta \vec{u}_{\alpha(2)}, \quad \delta \left(\frac{\partial \vec{u}_{\alpha(1)}}{\partial n_{(12)}} \right) = \delta \left(\frac{\partial \vec{u}_{\alpha(2)}}{\partial n_{(12)}} \right). \quad (11)$$

Перемещения $\vec{u}_{\alpha(j)}$ и градиенты $\nabla \vec{u}_{\alpha(j)}$ на участке $S_\alpha \subset S_{(12)}$, входящие в выражение (11) имеют следующую связь:

$$\vec{u}_{\alpha(1)} - \vec{u}_{\alpha(2)} = 0, \quad \nabla \vec{u}_{\alpha(1)} - \nabla \vec{u}_{\alpha(2)} = C_{S_{(12)}}. \quad (12)$$

Перемещения $\vec{u}_{\alpha(12)}$ и тензор $C_{S_{(12)}}$ задаются дополнительными соотношениями с учетом несогласованности атомных решеток $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$.

Кроме полученных выше уравнений должны выполняться следующие равенства:

$$\vec{n}_{(12)} \cdot (P_{\alpha(1)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{\alpha(1)}^{(2)}) - \nabla_s \cdot (\vec{n}_{(12)} \cdot P_{\alpha(1)}^{(2)}) + \vec{n}_{(21)} \cdot (P_{\alpha(2)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{\alpha(2)}^{(2)}) - \nabla_s \cdot (\vec{n}_{(21)} \cdot P_{\alpha(2)}^{(2)}) = \vec{0}, \quad (13)$$

$$(\vec{n}_{(12)} \vec{n}_{(12)}) \cdot P_{\alpha(1)}^{(2)} + (\vec{n}_{(21)} \vec{n}_{(21)}) \cdot P_{\alpha(2)}^{(2)} = \vec{0}. \quad (14)$$

В зоне контакта оболочки и абразива $\vec{r} \in dS_\beta$, где адгезинной связи нет, будет отмечаться дефект несоответствия атомных решеток. Поэтому:

$$\delta \vec{u}_{\beta(1)} = \delta \vec{u}_{\beta(2)}, \quad \vec{u}_{\beta(j)} = \vec{u}_{\alpha(j)}. \quad (15)$$

Примем, что дефектные участки не пересекаются друг с другом. В этом случае на их границах (для случая $\vec{r} \in dS_\beta$) должно выполняться следующее условие:

$$\vec{n}_{(12)} \cdot (P_{\alpha(1)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{\alpha(1)}^{(2)}) - \nabla_s \cdot (\vec{n}_{(12)} \cdot P_{\alpha(1)}^{(2)}) = \vec{0}, \quad (16)$$

$$\vec{n}_{(21)} \cdot (P_{\alpha(2)}^{(1)} - \nabla \cdot P_{\alpha(2)}^{(2)}) - \nabla_s \cdot (\vec{n}_{(21)} \cdot P_{\alpha(2)}^{(2)}) = \vec{0}, \quad (17)$$

$$(\vec{n}_{(12)} \vec{n}_{(12)}) \cdot P_{\alpha(1)}^{(2)} = \vec{0}, \quad (18)$$

$$(\vec{n}_{(21)} \vec{n}_{(21)}) \cdot P_{\alpha(2)}^{(2)} = \vec{0}. \quad (19)$$

Записанные выше условия позволяют определить поле $\vec{u}_{\beta(j)}$ для случая $\vec{r} \in dS_\beta$.

Поэтому:

$$\delta \left(\frac{\partial \vec{u}_{\beta(1)}}{\partial n_{(12)}} \right) = 0, \quad \delta \left(\frac{\partial \vec{u}_{\beta(2)}}{\partial n_{(12)}} \right) = 0. \quad (20)$$

В месте контакта оболочки с абразивом при условии согласованности полей напряжений и перемещений должно выполняться условие сопряжения (9). При этом поля $\vec{u}_{\alpha(j)}(\vec{r})$ и $\vec{u}_{\beta(j)}(\vec{r})$ определяются независимо друг от друга. После определения их значений можно установить уровень энергии несоответствия оболочки $B_{(1)}$ и абразива $B_{(2)}$ по следующему выражению:

$$W_{(12)}(\beta) = (1-\beta)^2 W_{\alpha\alpha} + \beta(1-\beta) W_{\alpha\beta} + \beta^2 W_{\beta\beta}. \quad (21)$$

Введем суммарную величину по абразиву в оболочке W_{pm} , ($p, m = \alpha, \beta$), зависящую от суммарной работы сил $P_{(j)}^{(k)}$ на обобщенном поле $\nabla^k \vec{u}_{(j)}$ и запишем условие для ее определения:

$$W_{pm} = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \int_0^{\nabla^k \vec{u}_{(j)}} P_{p(j)}^{(k)} d(\nabla^k \vec{u}_{(j)}). \quad (22)$$

В результате приведенных теоретических положений, возможно, определить поврежденность адгезионного контакта полимерной оболочки с абразивом из условия, что дефект покрытия формируется на участке контакта, где энергия взаимодействия имеет минимальное значение по следующей зависимости:

$$\beta = \frac{\partial W_{(12)}}{\partial \beta} = \left[1 + \frac{2W_{\alpha\alpha} - W_{\alpha\beta}}{2W_{\beta\beta} - W_{\alpha\beta}} \right]^{-1}. \quad (23)$$

Расчеты по выражению (23) поврежденности адгезионного контакта (относительная площадь отсутствия контакта), например, полистирола (PS) с поверхностью абразива из карбида кремния составила величину $\beta = 0,47$. Это указывает на то, что соединение оболочки с абразивом слабое. Кроме этого разность коэффициентов термического расширения (для

полистирола $\alpha \equiv 5 \cdot 10^{-5} \text{ I/K}$, для карбида кремния эта величина намного меньше $\alpha \equiv 4 \cdot 10^{-8} \text{ I/K}$) еще более снижают сплошность контакта абразива с полимером в процессе сушки в псевдоожженном слое.

Заключение

Получены теоретические выражения для определения поврежденности адгезионного контакта полимерной оболочки с абразивом из условия, что дефект покрытия формируется на участке контакта, где энергия взаимодействия имеет минимальное значение. На основе расчета установлено, что слабая адгезия и недостаточный уровень поверхностной энергии гидрофобного полимера, например, полистирола (PS), приводят к несплошности контакта компаунд-протектора на поверхности абразива. Поэтому, необходимо предварительно повысить поверхностную энергию и адгезию путем химической активации абразивной частицы. Чтобы добиться этого, абразив следует заранее подготовить, обработав его растворителем, который обладает химическим родством к компонентам его поверхности и полимера. Вследствие химической реакции абразива с данным раствором, на его поверхности необходимо сформировать активные зоны, способные к взаимодействию с молекулами полимера. Это улучшит адгезионные свойства и увеличит поверхностную энергию абразивного материала перед нанесением компаунд-протектора.

Работа выполнена в рамках государственного задания проект № 1024112000014-2-1.2.1;2.3.1 (FSGN-2025-0001)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков Г.В., Журавлева Т.А. Исследование влияния технологических режимов гидроабразивного резания на расслоение поверхности деталей из стеклотекстолита // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: научно-технический журнал. - 2013. - № 4 (300). - С. 47-55.
2. Chen, Z, Ren, Q, Su, J, Wang, Y, Xue, S, & Han, C. "Development and Experimental Study of Ultra-High Pressure Abrasive Water Cutting Equipment for Deep-Sea Sunken Ship." Proceedings of the ASME 2022 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Volume 1: Fluid Applications and Systems (FASTC); Fluid Measurement and Instrumentation (FMITC); Fluid Mechanics (FMTC). Toronto, Ontario, Canada. August 3–5, 2022. V001T01A006. ASME. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2022-86880>
3. Ilyukhina A.A., Kolpakov V.I., Veltishchev V.V. Engineered Estimate of the Design Parameters of a Built-up Jet-Forming Nozzle for Mobile Underwater Waterjet Cutting Systems // BMSTU Journal of Mechanical Engineering V. 4(733), 2021. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-4-30-39.
4. Wang Honglun, Gong Liehang, Yao Di, Investigation of Cutting Nozzle in High Pressure // Water Jet, J. Machine Tool & Hydraulics, 5(2005)42-44.
5. Pi V.N., Tuan N.Q. A Study on Nozzle Wear Modeling in Abrasive Waterjet Cutting. AMR 2009;76–78:345–50. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.76-78.345>.
6. Yu Ying Jiang, Lie Hang Gong, Hai Tao Wang, Cong Cong Gong, Xin Lin Xu Theoretical and Experimental Analysis of the Influence of Abrasives on Nozzle in Pre-Mixed Abrasive Water Jet // Applied Mechanics and Materials (Volume 233) P. 425-428 DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.233.425
7. M. Hashish Mixing tube material effects and wear patterns // Proceedings of the 9th American Waterjet Conference, August 23-26, 1997, p. 211.
8. Greg A. Mort, Long life abrasive water jet nozzles and their effect on AWJ cutting // Proceedings of the 6th American Waterjet Conference, August 24-27, 1991: Houston, Texas, p. 315.
9. Барсуков Г.В., Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Кожус О.Г., Кожус С.В. Жизненный цикл абразивного зерна в полимерной оболочке в процессе гидроабразивной резки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: научно-технический журнал. – 2019. - № 6 (338). - С. 72-79.
10. Hemati M., Cherif R., Saleh K., Pont V. Fluidized bed coating and granulation: influence of process-related variables and physicochemical properties on the growth kinetics, Powder Technol. 130 (2003) 18–34, [https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(02\)00221-8](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(02)00221-8).
11. Zhang R., Hoffmann T., Tsotsas E. Novel technique for coating of fine particles using fluidized bed and aerosol atomizer, Processes 8 (2020) 1525, <https://doi.org/10.3390/pr8121525>.
12. Neugebauer C., Palis S., Bück A., Tsotsas E., Heinrich S., Kienle A. A dynamic two-zone model of continuous fluidized bed layering granulation with internal productclassification, Particuology 31 (2017) 8–14, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.07.001>.
13. Brignone S.G., Ravetti S., Maletto B.A., Palma S.D. Optimization of microparticle coating parameters with Cell Wall of *Saccharomyces cerevisiae* by fractional factorial design, J. Pharm. Innov. 16 (2021) 603–619, <https://doi.org/10.1007/s12247-020-09473-x>.

14. Dewettinck K., Huyghebaert A. Fluidized bed coating in food technology, Trends Food Sci. Technol. 10 (1999) 163–168, [https://doi.org/10.1016/s0924-2244\(99\)00041-2](https://doi.org/10.1016/s0924-2244(99)00041-2).

Барсуков Геннадий Валерьевич

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения г. Орёл ул. Московская д. 34 Тел: +79038806976 E-mail: awj@list.ru

Кожус Ольга Геннадьевна

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, кандидат технических наук, СНС НИЛ «ППТ» г. Орёл ул. Наугорское ш. 29 Тел: +79038806976 E-mail: okozhus@mail.ru

Заброда Сергей Викторович

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, инженер НИЛ «ППТ» г. Орёл ул. Наугорское ш. 29 тел. +79038806976 E-mail: sergei.metelcut@yandex.ru

Сафронов Даниил Петрович

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, студент, лаборант НИЛ «ППТ» г. Орёл ул. Наугорское ш. 29 тел. +79038806976 E-mail: daniilsafronov0408@gmail.com

Крыгина Елизавета Павловна

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, студент, лаборант НИЛ «ППТ» г. Орёл ул. Наугорское ш. 29 тел. +79038806976 E-mail: kirina090464@mail.ru

BARSUKOV G.V., KOZHUS O.G., ZABRODA S.V., SAFRONOV D.P., KRYGINA E.P.

THEORETICAL STUDY OF THE BOND STRENGTH OF POLYMER PROTECTOR COMPOUND TO ABRASIVE FOR UNDERWATER WATERJET CUTTING

Abstract. The authors present the results of a theoretical study of the bond strength between a polymer shell and an abrasive, assuming that a coating defect forms at the contact point where the interaction energy is minimal. It has been established that weak adhesion and insufficient surface energy of the hydrophobic polymer lead to discontinuities in the contact of the protector compound with the abrasive surface. A method for increasing the surface energy and adhesion of the abrasive surface before applying the protector compound is recommended.

Keywords: abrasive, waterjet cutting, protector compound, shell, coating, adhesion energy, polymer.

BIBLIOGRAPHY

1. Barsukov, G.V., Zhuravleva, T.A. "Investigation of the Effect of Waterjet Cutting Modes on the Surface Delamination of Fiberglass Parts." Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology: Scientific and Technical Journal. - 2013. - No. 4 (300). - Pp. 47-55.
2. Chen, Z., Ren, Q., Su, J., Wang, Y., Xue, S., & Han, C. "Development and Experimental Study of Ultra-High Pressure Abrasive Water Cutting Equipment for Deep-Sea Sunken Ship." Proceedings of the ASME 2022 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Volume 1: Fluid Applications and Systems (FASTC); Fluid Measurement and Instrumentation (FMITC); Fluid Mechanics (FMTC). Toronto, Ontario, Canada. August 3–5, 2022. V001T01A006. ASME. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2022-86880>
3. Ilyukhina A.A., Kolpakov V.I., Veltishchev V.V. Engineered Estimate of the Design Parameters of a Built-up Jet-Forming Nozzle for Mobile Underwater Waterjet Cutting Systems // BMSTU Journal of Mechanical Engineering V. 4(733), 2021. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-4-30-39.
4. Wang Honglun, Gong Liehang, Yao Di, Investigation of Cutting Nozzle in High Pressure // Water Jet, J. Machine Tool & Hydraulics, 5(2005)42-44.
5. Pi V.N., Tuan N.Q. A Study on Nozzle Wear Modeling in Abrasive Waterjet Cutting. AMR 2009;76–78:345–50. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.76-78.345>.
6. Yu Ying Jiang, Lie Hang Gong, Hai Tao Wang, Cong Cong Gong, Xin Lin Xu Theoretical and Experimental Analysis of the Influence of Abrasives on Nozzle in Pre-Mixed Abrasive Water Jet // Applied Mechanics and Materials (Volume 233) P. 425-428 DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.233.425

7. M. Hashish Mixing tube material effects and wear patterns // Proceedings of the 9th American Waterjet Conference, August 23-26, 1997, p. 211.
8. Greg A. Mort, Long life abrasive water jet nozzles and their effect on AWJ cutting // Proceedings of the 6th American Waterjet Conference, August 24-27, 1991: Houston, Texas, p. 315.
9. Barsukov G.V., Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Kozhus O.G., Kozhus S.V. Life cycle of abrasive grain in a polymer shell during waterjet cutting // Fundamental and applied problems of engineering and technology: scientific and technical journal. - 2019. - No. 6 (338). - P. 72-79.
10. Hemati M., Cherif R., Saleh K., Pont V. Fluidized bed coating and granulation: influence of process-related variables and physicochemical properties on the growth kinetics, Powder Technol. 130 (2003) 18–34, [https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(02\)00221-8](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(02)00221-8).
11. Zhang R., Hoffmann T., Tsotsas E. Novel technique for coating of fine particles using fluidized bed and aerosol atomizer, Processes 8 (2020) 1525, <https://doi.org/10.3390/pr8121525>.
12. Neugebauer C., Palis S., Bück A., Tsotsas E., Heinrich S., Kienle A. A dynamic two-zone model of continuous fluidized bed layering granulation with internal product classification, Particuology 31 (2017) 8–14, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.07.001>.
13. Brignone S.G., Ravetti S., Maletto B.A., Palma S.D. Optimization of microparticle coating parameters with Cell Wall of *Saccharomyces cerevisiae* by fractional factorial design, J. Pharm. Innov. 16 (2021) 603–619, <https://doi.org/10.1007/s12247-020-09473-x>.
14. Dewettinck K., Huyghebaert A. Fluidized bed coating in food technology, Trends Food Sci. Technol. 10 (1999) 163–168, [https://doi.org/10.1016/s0924-2244\(99\)00041-2](https://doi.org/10.1016/s0924-2244(99)00041-2).

Barsukov Gennady Valeryevich

Oryol State University
named after I.S. Turgenev,
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Mechanical Engineering
Orel, Moskovskaya str., 34
+79038806976
E-mail: awj@list.ru

Kozhus Olga Gennadievna

Oryol State University
named after I.S. Turgenev,
Candidate of Technical Sciences,
Leading Engineer of the Department of Organizational
Support of Research
Orel, Naugorskoe sh. 29
+79038806976
E-mail: okozhus@mail.ru

Zabroda Sergey Viktorovich

Oryol State University
named after I.S. Turgeneva,
engineer of Research Laboratory of "PPT"
Orel st. Naugorskoe highway 29
tel. +79038806976
E-mail: sergei.metelcut@yandex.ru

Safronov Daniil Petrovich

Oryol State University
named after I.S. Turgeneva,
student, laboratory assistant of Research Laboratory of
"PPT"
Orel st. Naugorskoe highway 29
tel. +79038806976
E-mail: daniilsafronov0408@gmail.com

Krigina Elizaveta Pavlovna

Oryol State University
named after I.S. Turgenev,
student, laboratory assistant at the Research Laboratory
of "PPT"
Oryol, Naugorskoe Highway 29
tel. +79038806976
E-mail: kirina090464@mail.ru

© Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Заброда С.В., Сафронов Д.П., Крыгина Е.П., 2025

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧАЕМОГО МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ЕГО МОДИФИЦИРОВАНИИ

Аннотация. Статья посвящена вопросу модифицирования покрытий, получаемых методом микродугового оксидирования деталей из алюминиевых сплавов. Для модифицирования применялись твердосмазочные материалы на основе графита и молибдена, как наиболее перспективные. Проведены сравнительные испытания на износ и скорость изнашивания. Подтверждено влияние сквозной пористости МДО-покрытия на долговечность и износостойкость модифицирующего слоя.

Ключевые слова: Микродуговое оксидирование, модифицирование, твердосмазочные материалы, сравнительные испытания на износ.

Введение

Детали из вентильных сплавов, в частности алюминия находят применения во всём больших областях машиностроения и автомобилестроения. Но, для того чтобы увеличить ресурс подвижных соединений, выполненных из данных сплавов, зачастую требуется дополнительное упрочнение.

Одним из способов упрочнения и восстановления деталей из алюминиевых сплавов является микродуговое оксидирование. Данный метод позволяет значительно повысить износостойкость и долговечность изделий. При формировании МДО-покрытий на алюминиевых сплавах чаще всего используют силикатно-щелочной электролит типа «КОН- Na_2SiO_3 » [4, 5, 11].

Технология МДО достаточно хорошо отработана для таких металлов и их сплавов как – алюминий, титан, магний, tantal и другие. Они входят в группу вентильных металлов. Вентильными их называют потому, что оксидокерамические покрытия, которые формируются на их поверхности электрохимическим путём, имеют униполярную или асимметричную проводимость в системе «металл – оксид – электролит». В этом случае за счет образования анодной оксидной плёнки на металле формируется положительный потенциал, который соответствует запирающему или обратному направлению. Поэтому система действует как полупроводниковый вентиль. Метод МДО лишен многих недостатков, которые имеются у других технологий поверхностного упрочнения. Основными преимуществами технологии МДО являются: создание многофункциональных покрытий требуемой толщины, состава и структуры; регулирование скорости процесса формирования покрытия; доступность компонентов электролита; процесс считается экологичным, за счет отсутствия токсичных компонентов при использовании силикатно-щелочных электролитов [2, 3, 6, 7, 9, 11]. Количество работ по изучению свойств упрочненных слоев формируемых МДО и их применению в различных отраслях за последнее десятилетие значительно возросло [1, 8]. Это свидетельствует о том, что они обладают уникальным комплексом свойств.

Анализ

Одной из ключевых особенностей покрытий, сформированных МДО, является пористость. На пористость покрытия влияет множество факторов, такие как температура электролита в процессе упрочнения, пропорциональное соотношение компонентов электролита (КОН и Na_2SiO_3), а также параметры тока и время упрочнения. На рисунках 1, 2, 3 представлены графики влияния различных факторов на пористость. [10].

Одним из возможных способов модифицирования покрытий, получаемых методом микродугового оксидирования является нанесение твердосмазочных материалов. В частности распылением.

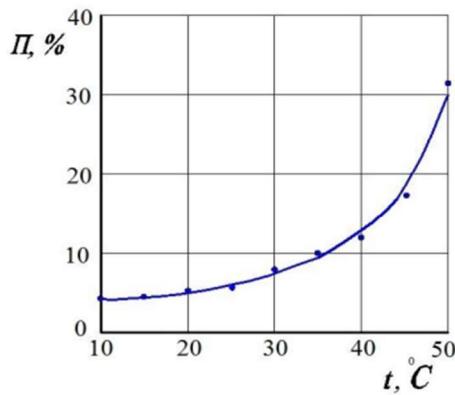


Рисунок 1 – Влияние температуры электролита t на сквозную пористость Π МДО-покрытия при $D_m=25$ A/dm^2 ; $T=80$ мин; $\text{Скон}=2$ г/л; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л [11]

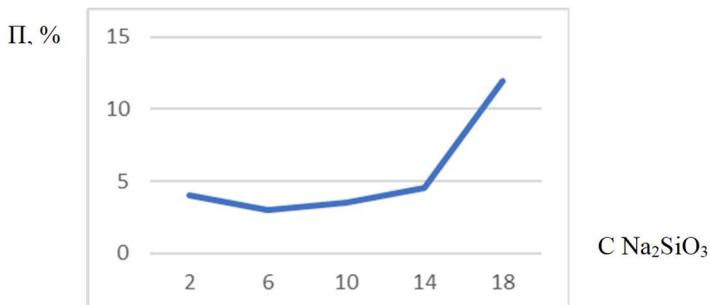


Рисунок 2 – Влияние концентрации Na_2SiO_3 на сквозную пористость Π МДО-покрытия при $D_m=25$ A/dm^2 ; $T=80$ мин; $\text{СКОН}=2$ г/л [10]

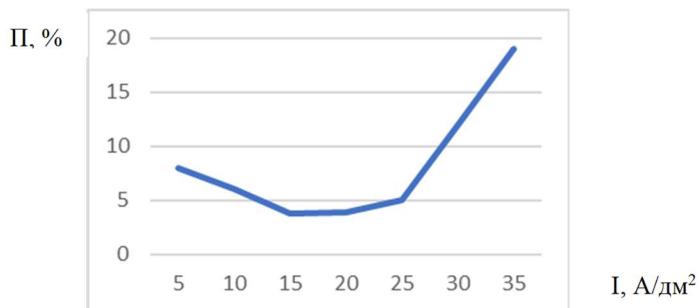


Рисунок 3 – Влияние плотности тока I на сквозную пористость Π МДО-покрытия при $D_m=25$ A/dm^2 ; $T=80$ мин; $\text{Скон}=2$ г/л; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л [10]

При нанесении ТСМ, состав находится в жидким состоянии и отвердевает при контакте с кислородом после сушки в течение 2-х часов в печи при температуре 250 °С, либо при комнатной температуре в течение суток.

В качестве примера рассматриваем пару трения поршень-цилиндр. В современных ДВС на юбки поршня наносится ТСМ, для снижения коэффициента трения и как следствие увеличения ресурса и снижения температуры узла трения. В данном случае удержание смазки на юбке поршня происходит благодаря адгезии. Согласно механической теории, адгезия - результат проникновения молекул адгезива в верхний слой субстрата и объясняет склеивание только пористых материалов, либо материалов с развитой шероховатостью.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что развитая пористость МДО покрытия способствует улучшению адгезии ТСМ и, как следствие износостойкости покрытия.

Для подтверждения данных тезисов были проведены испытания на изнашивание на образцах.



Рисунок 4 – Упрочненные образцы:

1, 2 – Образцы упрочненные МДО, 3 – Образец МДО+ТСМ Modengy для деталей ДВС,
4 – Образец с нанесенным ТСМ Modengy для деталей ДВС

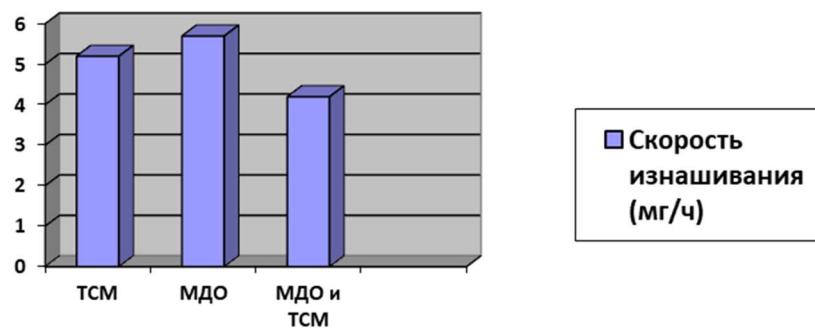


Рисунок 5 – Скорость изнашивания покрытий МДО и ТСМ

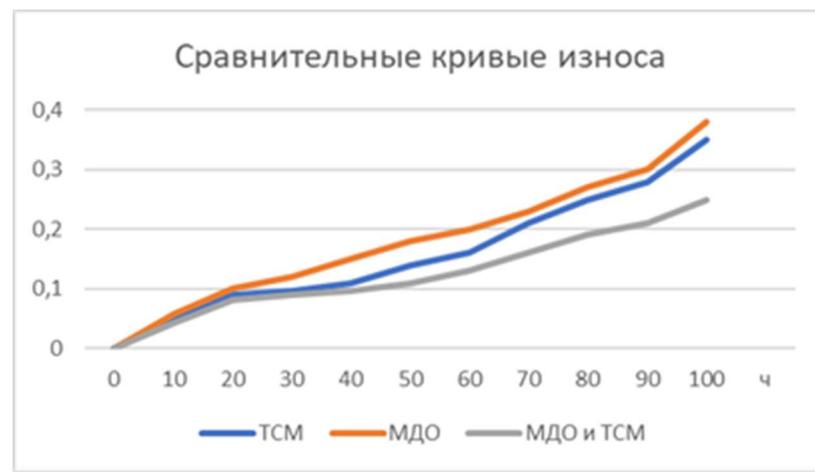


Рисунок 6 – Сравнительные кривые износа

Испытания на машине трения показали, что скорость изнашивания пары трения «серый чугун СЧ-26 – МДО-покрытие» на 9,6% выше скорости изнашивания пары трения «серый чугун СЧ-26 – АК18 с нанесенным ТСМ Modengy для деталей ДВС» и на 35,7% выше, чем «серый чугун СЧ-26 – МДО+ТСМ Modengy для деталей ДВС». Это связано с особенностями работы МДО-покрытия в условиях граничного трения, которое более всего проявляется в ДВС

во время холодных пусков. Результаты испытаний по скорости изнашивания представлены на рисунке 5.

Для проведения испытаний применялась экспериментальная установка для МДО, находящаяся на кафедре «Надёжность и ремонт машин» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ имени Н.В. Паракина, машина трения МТУ-01, ЭВМ и лабораторные весы Setra E-500.

На рисунке 6 показаны сравнительные кривые изнашивания пар трения.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что пористость МДО покрытия положительно влияет на долговечность и износостойкость ТСП и, как следствие, пары трения в целом.

Заключение

Результаты проведения сравнительных испытаний на износ пар трения в различных конфигурациях («серый чугун СЧ-26 – МДО-покрытие», «серый чугун СЧ-26 – АК18 с нанесенным ТСМ Modengy для деталей ДВС», «серый чугун СЧ-26 –МДО+ТСМ Modengy для деталей ДВС») показали:

скорость изнашивания пары трения «серый чугун СЧ-26 – МДО-покрытие» на 9,6% выше скорости изнашивания пары трения «серый чугун СЧ-26 – АК18 с нанесенным ТСМ Modengy для деталей ДВС» и на 35,7% выше, чем «серый чугун СЧ-26 –МДО+ТСМ Modengy для деталей ДВС».

Исходя из этого можно сделать вывод, что применения ТСМ в качестве модифицирующего покрытие для поверхностей, сформированных микродуговым оксидированием целесообразно и особенно актуально при применении данного комбинированного покрытия на деталях цилиндро-поршневой группы, а именно на паре трения «поршень-цилиндр», так как при холодных пусках на начальном этапе работы двигателя возможна её работа в условиях граничного трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коломейченко, А. В. Комбинированная технология восстановления и упрочнения втулок шестеренных гидромоторов с использованием газодинамического напыления / А. В. Коломейченко, В. Н. Логачев, Н. В. Титов // Технический сервис машин. – 2022. – № 4(149). – С. 68-77. – DOI 10.22314/2618-8287-2022-60-4-68-77. – EDN KGTУМР.
2. Технология повышения ресурса крышек газораспределительного механизма двигателей / Н. В. Титов, В. Н. Логачев, А. В. Коломейченко [и др.] // Технический сервис машин. – 2023. – Т. 61, № 3(152). – С. 69-75. – DOI 10.22314/2618-8287-2023-61-3-69-75. – EDN LEGHYI.
3. ГОСТ 9.302 – 88 Покрытия металлические и неметаллические неорганические (методы контроля)
4. Новиков, А.Н. Взаимосвязь фазового состава и свойств упрочнённого слоя, нанесённого микродуговым оксидированием на алюминиевую деталь [Текст] / А.Н. Новиков, Ю.А. Кузнецов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1998. - № 2. – С. 27-28.
5. Пат. 2227088 Российская Федерация, В 23 Р 6/02. Способ восстановления юбок поршней двигателей внутреннего сгорания [Текст]/ Н. В. Титов, А. В. Коломейченко. - № 2003115981/02; заявл. 28.05.2003; опубл. 20.04.2004, Бюл. № 11. – 6 с.
6. Степанов В.А. Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей микродуговым оксидированием днищ поршней двигателей: дис. ... канд. технических наук 05.20.03 / Степанов В.А. - Пенза., 2014.
7. Гуревич, А.М. Конструкция тракторов и автомобилей. / А.М. Гуревич, А.К. Болтов, В.И. Судницын. - М.: Агропромиздат, 1989. - 368 с.
8. Коломейченко, А.В. Технологии повышения долговечности деталей машин восстановлением и упрочнением рабочих поверхностей комбинированными методами [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук / А.В. Коломейченко. – М., 2011. - 31 с.
9. Voevodin, A.A. Characterisation of wear resistant Al-Si-O Coatings formed on al-based alloys by micro-arc discharge treatment [Text] / A.A. Voevo-din, A.L. Yerokhin, V.V. Lyubimov // Surface and Coating Technology. - 1996. - V 86-87. – P. 516-521.
10. Коломейченко, А. В. Технологии повышения долговечности деталей машин восстановлением и упрочнением рабочих поверхностей комбинированными методами : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Коломейченко Александр Викторович. – Орел, 2011. – 365 с. – EDN QFKZHV.
11. Козлов А.В. Повышение износостойкости деталей машин микродуговым оксидированием с последующим модифицированием покрытия: дис. ... канд. технических наук 05.20.03 / Козлов А.В. - Орел., 2014.

Титов Николай Владимирович

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Надежности и ремонта машин
Тел: +79102693836
ogau@mail.ru

Шманев Николай Дмитриевич

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, аспирант
Тел: +79536120603
shmanyov@gmail.com

TITOV N.V., SHMANEV N.D.

INFLUENCE OF POROSITY OF THE COATING OBTAINED BY THE METHOD OF MICROARC OXIDATION OF PARTS FROM ALUMINIUM ALLOYS ON THE DURABILITY OF HARD-AND-SMOKE MATERIALS USED IN ITS MODIFICATION

Abstract. The article is devoted to the issue of modification of coatings obtained by the method of microarc oxidation of parts from aluminum alloys. Graphite and molybdenum-based solid lubricants were used for modification, as they are the most promising. Comparative tests for wear and wear rate were conducted. The effect of through-pore MDO coating on durability and wear resistance of the modifying layer was confirmed.

Keywords: Microarc oxidation, modification, solid lubricants, comparative tests for wear.

BIBLIOGRAPHY

1. Kolomeichenko, A.V. Combined technology of restoration and hardening of gear motor bushings using gas dynamic spraying / A.V. Kolomeichenko, V. N. Logachev, N. V. Titov // Technical service of machines. – 2022. – № 4(149). – Pp. 68-77. – DOI 10.22314/2618-8287-2022-60-4-68-77. – EDN KGTYMP.
2. Technology for Increasing the Resource of Engine Camshaft Covers / N. V. Titov, V. N. Logachev, A. V. Kolomeichenko [et al.] // Technical Service of Machines. – 2023. – Vol. 61, No. 3(152). – Pp. 69-75. – DOI 10.22314/2618-8287-2023-61-3-69-75. – EDN LEGHYI.
3. GOST 9.302 – 88 Coatings, metallic and non-metallic inorganic (methods of control)
4. Novikov, A.N. Interrelation of phase composition and properties of the hardened layer, deposited by micro-arc oxidation on an aluminum part [Text] / A.N. Novikov, Yu.A. Kuznetsov // Mechanization and electrification of agriculture. - 1998. - No. 2. – Pp. 27-28.
5. Pat. 2227088 Russian Federation, At 23 P 6/02. A method for restoring piston skirts of internal combustion engines [Text] / N.V. Titov, A.V. Kolomeichenko. - No. 2003115981/02; application. 05/28/2003; published. 04/20/2004, Bul. no. 11. – 6 p.
6. Stepanov V.A. Improving the performance of cars by microarc oxidation of piston bottoms of engines: dis. ... Candidate of Technical Sciences 05.20.03 / Stepanov V.A. - Penza., 2014.
7. Gurevich, A.M. Construction of tractors and automobiles. / A.M. Gurevich, A.K. Boltov, V.I. Sudnitsyn. - M.: Agropromizdat, 1989. - 368 p.
8. Kolomeichenko, A.V. Technologies for increasing the durability of machine parts by restoring and strengthening working surfaces using combined methods [Text] : abstract of the dissertation. ... doc. Technical Sciences / A.V. Kolomeichenko, Moscow, 2011, 31 p.
9. Voevodin, A.A. Characterization of wear resistant Al-Si Coatings formed on al-based alloys by micro-arc discharge treatment [Text] / A.A. Voevo-din, A.L. Yerokhin, V.V. Lyubimov // Surface and Coating Technology. - 1996. - V 86-87. – P. 516-521.
10. Kolomeichenko, A.V. Technologies for increasing the durability of machine parts by restoring and strengthening working surfaces using combined methods : specialty 05.20.03 "Technologies and maintenance facilities in agriculture" : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Kolomeichenko Alexander Viktorovich. – Orel, 2011. – 365 p. – EDN QFKZHV.
11. Kozlov A.V. Increasing the wear resistance of machine parts by microarc oxidation with subsequent modification of the coating: dis. ... Candidate of Technical Sciences 05.20.03 / Kozlov A.V. - Orel., 2014.

Titov Nikolai Vladimirovich

Oryol State Agrarian University
named after N.V. Parakhin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Reliability and Repair of Machinery
Tel: +79102693836
ogau@mail.ru

Shmanev Nikolay Dmitrievich

Orel State Agrarian University
named after N.V. Parakhin, postgraduate student.
Tel: +79536120603
shmanyov@gmail.com

МОИСЕЕВ Д.В., ВОЖКОВ А.А., КОЛЕСОВ А.Г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОВ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ФИНИШНОЙ ОПЕРАЦИИ

Аннотация. Для поиска новых более производительных технических решений на финишных операциях, обеспечивающих требуемую шероховатость предложен вариант поиска решения моделирования последовательности циклов внутреннего шлифования, который базируется на моделях составляющих силы резания и съема металла. Допустимость и эффективность такого подхода подтверждается экспериментально.

Ключевые слова: цикл внутреннего шлифования, шероховатость, метод динамического программирования, режимы резания, технологические ограничения.

Введение

Финишные операции, такие как внутреннее шлифование, играют решающую роль в определении эксплуатационных свойств и функциональности изделия.

Современный уровень развития техники характеризуется повышением требований к качеству механизмов и машин. Важнейшими факторами, определяющими потребительские качества, долговечность, надежность и точность работы машин и приборов, являются погрешности размеров, отклонения формы, шероховатость, волнистость поверхностей и др.[1,3] При изготовлении широкого класса деталей машин и приборов, нужно с одной стороны выдерживать высокие требования по качеству получения геометрических размеров, шероховатости и физико-механическому состоянию поверхностного слоя, с другой стороны повышать производительность их выпуска в связи с требованиями рынка. Ставится задача не только повысить точность изготовления деталей в целом, но и обеспечить стабильность их параметров. Исследования в области создания технологических процессов окончательного формообразования рабочих поверхностей прецизионных деталей, позволяют повысить качество обработки деталей, а значит, и эксплуатационные свойства всего изделия.

Представленные работы освещают широкий спектр проблем, возникающий при абразивной обработке, посвящены созданию технологических процессов, обеспечивающих качественную обработку деталей, позволяют решать комплекс задач направленных на существенное повышение производительности обработки, уменьшение себестоимости производства изделий, улучшение качества выпускаемой продукции, а также повышение культуры производства и безопасности труда. В них показана необходимость дальнейшего повышения производительности финишных методов, что возможно за счет комплексной механизации и автоматизации всех производственных процессов.

Однако, не смотря на накопленный опыт, в настоящее время, для стабилизации показателей качества технологические режимы назначаются исходя опыта технолога или рекомендаций приведенных в справочной литературе. При прогнозировании состояния технологической системы используются эмпирические модели протекания технологического процесса, полученные методами многофакторного планирования эксперимента. Погрешность таких моделей в ряде случаев достигает 100-300%, что не позволяет их использовать для расчета режимов резания при шлифовании поверхностей прецизионных деталей приборов.

В статье представлен вариант поиска решения моделирования последовательности циклов внутреннего шлифования, который базируется на модели составляющих силы резания и модели съема металла. В качестве математического метода оптимизации циклов шлифования используется метод динамического программирования. Оптимизируется время съема для заданного цикла шлифования, при этом прочность инструмента, ожидаемые значения шероховатости и точности обработанной поверхности рассматриваем как ограничения а силы резания, как совокупность режимов обработки как управляющее воздействие [2].

Основная часть

При анализе точности геометрических параметров деталей различают номинальные (идеальные, не имеющие отклонений формы и размеров) поверхности, форма которых задана чертежом, и реальные (действительные) поверхности, ограничивающие тело и отделяющие его от окружающей среды [1]. У деталей реальные поверхности получают в результате обработки.

Рассмотрим процедуру поиска траектории цикла на примере внутреннего шлифования. Графическое двумерное представление взаимосвязи параметров управления циклом представлено на рис. 1. При проектировании циклов внутришлифовальной обработки необходимо учесть технологические ограничения, накладываемые на процесс ограничения: по допустимой погрешности размеров обрабатываемой поверхности [4]; по осыпаемости шлифовального круга; по допустимой глубине дефектного слоя на поверхности; по допустимой шероховатости обрабатываемой поверхности; по расчетному диапазону изменения степени затупления круга за период стойкости между правками; по допустимому количеству ступеней переключения программной скорости подачи; по мощности приводов вращения.

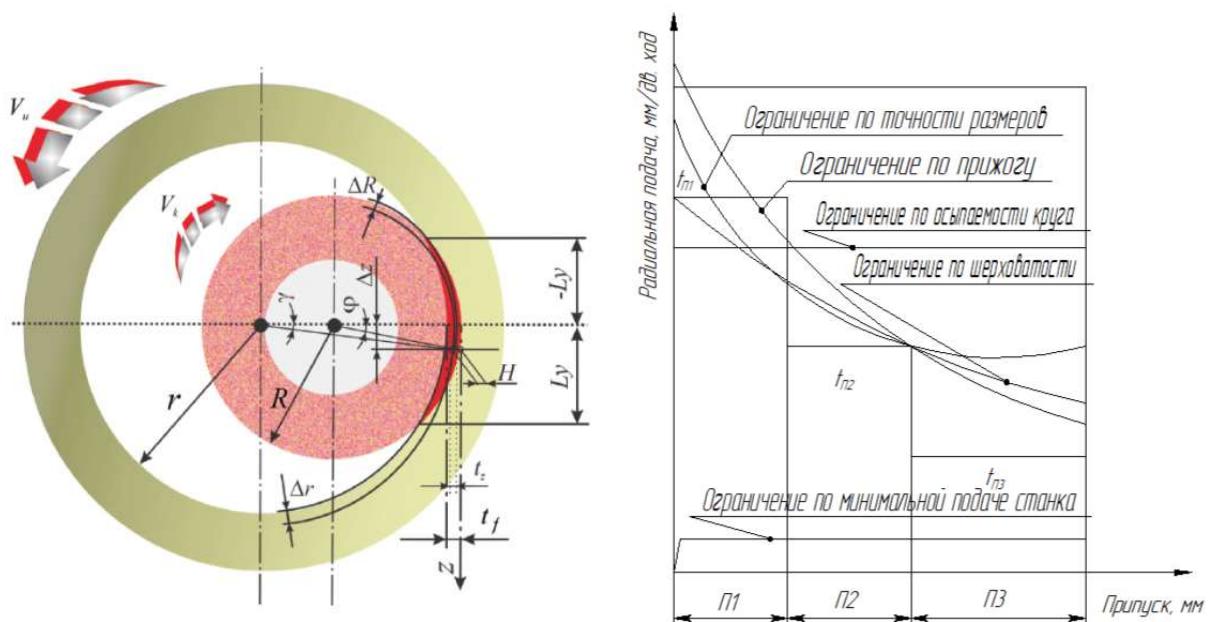


Рисунок 1 – Схема и трехступенчатый цикл внутреннего шлифования с ограничениями

Данный комплекс ограничений базируется на единой модели силы резания, взаимосвязанной с режимами резания, геометрией зоны резания, затуплением круга и его характеристикой [1, 5-7] (рис. 1).

Силовая модель процесса внутреннего шлифования на проход устанавливает взаимосвязь силы резания с параметрами цикла через упругие деформации технологической системы (H), уравнения 1-3 [8]:

- радиальная составляющая силы резания для внутреннего шлифования на проход:

$$P_y = \frac{1,9\sigma_i V_3 \tau_m S_{pad}}{V_k} + \frac{n \tau_m \sigma_i}{3} \sqrt{\frac{d D S_{pad}}{d - D}}, \quad (1)$$

- тангенциальная составляющая силы резания для внутреннего шлифования на проход

$$P_z = \frac{2,8\sigma_i V_3 \tau_m S_{pad}}{V_k} + \frac{\mu n \tau_m \sigma_i}{3} \sqrt{\frac{d D S_{pad}}{d - D}}, \quad (2)$$

- осевая составляющая силы резания для внутреннего шлифования на проход

$$P_x = \frac{1,86\sigma_i \pi d V_{oc} S_{pad}}{\sqrt{(V_k + V_z)^2 + V_{oc}^2}} + \frac{n \tau_m \sigma_i}{3} \sqrt{\frac{d D S_{pad}}{d - D}}, \quad (3)$$

где V_z - окружная скорость круга, м/с; V_z - скорость вращения заготовки, м/мин; S_{pad} - радиальная подача на i -ом ходе z -й ступени, мм/дв.ход; σ - среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм²; d - диаметр заготовки, мм; D - диаметр круга, мм; η - степень затупления круга; μ - коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемому материалу.

С достаточной для практических целей точностью [7] экспериментальные зависимости Ra от показателей условий шлифования можно отразить следующей зависимостью: $Ra = (Ra_0 - Ra_{cm}) \cdot \exp(-C_1 \cdot t) + Ra_{cm} \cdot \exp(C_2 \cdot t)$, где Ra_0 - начальная шероховатость, которая зависит в основном от показателей режима и способа правки, а также от отношения радиальной силы P_y к ширине шлифования B ; Ra_{cm} «стабильная» шероховатость, которая зависит в основном от отношения радиальной силы P_y к ширине шлифования B ; C_1 - параметр, характеризующий длительность периода «приработки», который обусловлен значениями показателей режима шлифования; C_2 - параметр, характеризующий интенсивность увеличения показателя шероховатости, который зависит от твердости шлифовального круга и отношения радиальной силы P_y к ширине шлифования B ; t - время шлифования после правки шлифовального круга.

Постановка задачи

Поскольку управление фактически снятым припуском осуществляется через ступенчатое изменение программной подачи, то с увеличением числа ступеней возможно максимально приблизить величину фактически снятого припуска к области ограничений, увеличив тем самым производительность цикла. В идеале бесступенчатый цикл, т. е. цикл с плавным изменением программной подачи будет являться самым производительным, так как он потенциально может обеспечить полное совпадение траектории фактически снятого припуска с границей области допустимых значений и тем самым достичь теоретического предела производительности цикла. Однако увеличение количества ступеней цикла целесообразно вести до определенного предела, так как в дальнейшем не обеспечивается значимый прирост производительности. Количество ступеней является параметром управления цикла и подбирается для определенных условий обработки с целью обеспечения высокой производительности.

Цель исследования построение цикла шлифования для обработки конкретной партии заготовок. Задача требует отыскания детерминированных режимных параметров цикла при нестабильных значениях ряда технологических ограничений и условий шлифования.

Результаты

Предложено использовать циклы с тремя режимами в соответствии с проведенными расчетами.

- Обеспечивается форма отверстия, исключаются погрешности базирования параметра шероховатости поверхности $Ra = 0,4$ мкм при исходном параметре $Ra = 0,5$ мкм.

скорость шлифовальной головки - 12 м/с, скорость заготовки - 460 об/мин, продольная подача - от 50 мкм/с, поперечная подача - 10 мкм/ход

- Обеспечивается получение параметра шероховатости поверхности $Ra = 0,12 - 0,2$ мкм при исходном параметре $Ra = 0,4$ мкм.

скорость шлифовальной головки - 12 м/с, скорость заготовки - до 460 об/мин, продольная подача - от 25 мкм/с, поперечная подача - 6 мкм/ход

- Обеспечивается получение параметра шероховатости поверхности $Ra = 0,05 - 0,08$ мкм при исходном параметре $Ra = 0,12 - 0,2$ мкм.

скорость шлифовальной головки - 12 м/с, скорость заготовки - до 460 об/мин, продольная подача - от 10 мкм/с, поперечная подача - 3 мкм/ход



Рисунок 2 – Фрагмент экспериментального исследования

Проведена экспериментальная проверка полученных зависимостей фрагмент исследований представлен на рисунке 4. Образцы (диаметр отверстия - 21 мм, длина - 100 мм) шлифовали на станке RSM M 500 CNC специально изготовленным инструментом (скорость головки 12 м/с, скорость заготовки 460 об/мин).

Заключение

Практика использования на производстве показывает, что производственные мощности станков с ЧПУ использованы не полностью. Во многих случаях производительность данных станков ниже, чем на универсальных станках особенно при малых партиях деталей [4]. Причина значительного снижения производительности станков с ЧПУ заключается в отсутствии методик проектирования циклов, удовлетворяющих требованиям современного автоматизированного производства. В большинстве случаев пользуются подбором режимов резания путем обработки ряда пробных заготовок. При этом опираются на накопленный опыт обработки подобных деталей. Метод подбора режимов обработки является достаточно затратным, требует значительных затрат времени и производственных ресурсов.

В качестве математического метода построения циклов шлифования может быть использован метод динамического программирования. Оптимизируется время съема для заданного цикла шлифования, при этом силы резания, как совокупность режимов обработки рассматриваем как управляющее воздействие, а прочность инструмента, ожидаемые значения шероховатости и точности обработанной поверхности как ограничения.

Данная стратегия позволяет с математической точностью рассчитывать оптимальные значения радиальной и осевой подач на всех ступенях цикла, оптимальное распределение снимаемого припуска по ступеням цикла для радиальной и осевой подач, при которых обеспечивается минимальное время цикла с учетом заданных технологических ограничений целевой функции. Более детально данный вопрос будет освещен в последующих работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. - Севастополь: СевНТУ, 2012. - 304 с. - ISBN 978-617-612051-3.
2. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation / M. Leonesio, P. Parenti, A. Cassinari, G. Bianchi, M. Monn // Procedia CIRP. - 2012. - Vol. 4. - P. 166-171. - DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.
3. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface / J. Jung, P. Kim, H. Kim, J. Seok // Simulation Modelling Practice and Theory. - 2015. - Vol. 57. - P. 88-99. - DOI: 10.1016/j.simpat.2015.06.005.
4. Процедуры формирования параметров качества при механической обработке деталей. / А.А. Вожков, Д.В. Ярохина. Производственно-технический журнал «Главный механик». Москва: Панорама, 2020. – №9. – С. 17-23.
5. Обеспечение стабильности обработки поверхностей на операциях круглого наружного шлифования с позиций системного анализа / С. М. Братан, А. О. Харченко, Д. А. Лысенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2023. – № 1(357). – С. 84-93. – DOI 10.33979/2073-7408-2023-357-1-84-93.
6. Методика расчета числа операций при тонком шлифовании валков холодной прокатки и ее экспериментальная проверка / С. М. Братан, И. А. Дымченко, В. И. Головин, Ю. К. Новоселов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2023. – № 2(358). – С. 90-105. – DOI 10.33979/2073-7408-2023-358-2-90-105.
7. Стохастическая система управления операцией плоского шлифования / С. М. Братан, А. О. Харченко, Е. А. Владецкая // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2020. – № 1(339). – С. 75-82. – DOI 10.33979/2073-7408-2020-339-1-75-82.
8. Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки / С. М. Братан, А. С.

Моисеев Дмитрий Владимирович
ФГАОУ ВО Севастопольский
государственный университет, г.
Севастополь,
Доктор технических наук, декан
Факультета информационных
технологий
e-mail: dvmoiseev@mail.sevsu.ru

Вожжов Андрей Анатольевич
ФГАОУ ВО Севастопольский
государственный университет, г.
Севастополь,
Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автоматизации
и технологии машиностроения»,
e-mail: AA.Vozhzhov@mail.sevsu.ru

**Колесов Александр
Геннадиевич**
ФГАОУ ВО Севастопольский
государственный университет, г.
Севастополь,
Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автоматизации
и технологии машиностроения»
e-mail: agkolesov@mail.sevsu.ru

MOISEEV D.V., VOZHZHOV A.A., KOLESOV A.G.

SIMULATION OF INTERNAL GRINDING CYCLES TO ACHIEVE THE REQUIRED ROUGHNESS IN THE FINISHING OPERATION

Abstract. *To find new, more productive technical solutions for finishing operations that ensure the required roughness, a solution for modeling the sequence of internal grinding cycles has been proposed, based on models of the cutting force and metal removal components. The feasibility and effectiveness of this approach has been confirmed experimentally.*

Keywords: Internal grinding cycle, roughness, dynamic programming method, cutting conditions, process constraints.

BIBLIOGRAPHY

1. Novoselov Yu.K. Dynamics of surface formation during abrasive processing. - Sevastopol: SevNTU, 2012. - 304 p. - ISBN 978-617-612-051-3.
2. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation / M. Leonesio, P. Parenti, A. Cassinari, G. Bianchi, M. Monn // Procedia CIRP. - 2012. - Vol. 4. - P. 166-171. - DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.
3. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on the workpiece surface / J. Jung, P. Kim, H. Kim, J. Seok // Simulation Modelling Practice and Theory. - 2015. - Vol. 57. - P. 88-99. - DOI: 10.1016/j.smp.2015.06.005.
4. Procedures for forming quality parameters during mechanical processing of parts. / A.A. Vozhzhov, D.V. Yarokhina. Production and technical journal "Chief Mechanic". Moscow: Panorama, 2020. - No. 9. - P. 17-23.
5. Ensuring the stability of surface treatment in cylindrical external grinding operations from the standpoint of systems analysis / S. M. Bratan, A. O. Kharchenko, D. A. Lysenko // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2023. - No. 1 (357). - P. 84-93. – DOI 10.33979/2073-7408-2023-357-1-84-93.
6. Methodology for calculating the number of operations during fine grinding of cold rolling rolls and its experimental verification / S. M. Bratan, I. A. Dymchenko, V. I. Golovin, Yu. K. Novoselov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2023. - No. 2 (358). - P. 90-105. – DOI 10.33979/2073-7408-2023-358-2-90-105.
7. Stochastic control system for surface grinding operation / S. M. Bratan, A. O. Kharchenko, E. A. Vladetskaya // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2020. - No. 1 (339). - P. 75-82. . – DOI 10.33979/2073-7408-2020-339-1-75-82.
8. Modeling the relationships between input factors and output indicators of the internal grinding process taking into account mutual vibrations of the tool and the workpiece / S. M. Bratan, A. S. Chasovitina // Metal processing (technology, equipment, tools). - 2023. - Vol. 25, No. 1. - P. 57-70. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70.

Moiseev Dmitry Vladimirovich
Sevastopol State University,
Sevastopol,
Doctor of Engineering Sciences,
Dean of the Faculty of Information
Technology
email: dvmoiseev@mail.sevsu.ru

Vozhzhov Andrey Anatolyevich
Sevastopol State University,
Sevastopol, Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor of the
Department of Automation and
technology of mechanical engineering,
e-mail: AA.Vozhzhov@mail.sevsu.ru

Kolesov Alexander Gennadievich
Sevastopol State University,
Sevastopol, PhD in Engineering,
Associate Professor of the
Department of Automation and
technology of mechanical engineering
e-mail: agkolesov@mail.sevsu.ru

© Моисеев Д.В., Вожжов А.А., Колесов А.Г., 2025

ПРОЦЕСС ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Аннотация: рассмотрена процедура отработки производственной технологичности, позволившая получить научно обоснованный механизм управления исследованиями в области повышения качества и получения варианта выбора или создания нового метода комбинированной обработки на типовых научоемких изделиях авиакосмического и энергетического машиностроения, условия эксплуатации которых могут служить базой для расширенного использования полученных результатов в других отраслях техники и технологии. Процедура отработки построена на предложенном авторами критерии полезности, реализующим научный подход к выбору технологических воздействий в комбинированных методах обработки для обеспечения заданного уровня качества продукции на всех этапах ее создания и совершенствования от опытных до серийных изделий. Создана испытательная база для доказательства эффективности принятых вариантов производственной технологичности и целесообразности их расширенного использования во всех отраслях машиностроения даже в условиях ограничений, вызванных санкциями некоторых зарубежных стран. При выполнении работы авторы опирались на изобретения в области технологии комбинированных методов обработки, в том числе на собственные патенты, защищенные на государственном уровне.

Были обоснованы наиболее выигрышные технологические процессы, объединяющие механические, тепловые, химические, лучевые воздействия, включая различные варианты упрочнения.

Основные положения по управлению качеством продукции и обоснованию назначения межремонтных сроков подтверждены в процессе испытаний, выполненных по стандартным и отраслевым программам в требуемом объеме. Приведены результаты, достигнутые в процессе промышленного использования предлагаемых комбинированных методов обработки.

Ключевые слова: технологичность, типовые объекты, качество, испытания, область применения, результаты

Введение

Для отработки производственной технологичности были выбраны типовые детали, работающие в условиях крутильных колебаний на примере приводов авиакосмической техники, где при регламентных и восстановительных ремонтных работах необходимо периодически проводить замену участков длинномерных приводов и магистралей, выработавших ресурсный срок эксплуатации или досрочно утративших работоспособность. В последнем случае операции обычно проводятся на эксплуатируемых изделиях в полевых условиях при использовании минимального количества инструмента, оснастки и ограниченном доступе исполнителей в зону проведения операций. Здесь требуется на этапе отработки производственной технологичности обосновать минимально необходимое количество методов и средств, ускоряющих восстановление качества изделий. В сложных эксплуатационных условиях работают также длинномерные магистрали высокого давления, эксплуатируемые на атомных станциях под большим давлением в зоне потенциально опасной для персонала, выполняющего ремонтно-восстановительные операции, в том числе с использованием упрочнения поверхностного слоя [1], в большинстве случаев в местах труднодоступных для выполнения операций, где не желательно длительное присутствие исполнителей. Подобные сложности свойственны также магистралям современной техники, эксплуатируемой в авиакосмической отрасли, при ее модернизации и восстановлении эксплуатационных характеристик.

Для сокращения трудоемкости, ускорения сроков проведения операций при использовании ограниченного количества средств технологического оснащения потребовалось научное обоснование выбора методов и средств, инструмента и оборудования, что стало возможным при использовании механизма отработки производственной технологичности, рассмотренного в [2, 3], где применен принцип полезности, позволяющий на стадии создания нового способа объективно оценить его технологические возможности для рассматриваемых изделий и отрасли машиностроения. Для минимизации затрат на стадии изготовления изделия требуется назначить или создать оптимальный вариант изготовления

продукции, в основном из числа комбинированных методов [4, 5], предложенных учеными нашей страны [6].

Процедура отработки производственной технологичности в машиностроении

Процесс отработки производственной технологичности необходимо использовать при создания наукоемких изделий в авиакосмическом машиностроении и при выполнении ремонтно-восстановительных работ магистралей энергетической техники. Он включает следующие этапы:

1. Для обоснования решения о полезности в наукоемком машиностроении рассматриваемого способа или устройства по результатам отработки производственной технологичности требуется обеспечить научное обоснование границ изменения рассматриваемого значимого параметра и доказать что он является реальным инструментом управления технолога для назначения исходных условий, методов и средств изготовления, сборки и испытаний рассматриваемых вариантов мероприятий, их запуска в серийное производство, эксплуатацию и утилизацию. На этапе отработки производственной технологичности для реализации мероприятия технологам необходимо получить согласие заказчика нового или модернизируемого изделия, разработчика документации и согласовать вопросы обеспечения эксплуатационных показателей, заявленных заказчиком и детализированных разработчиком [7, 9].

2. После согласования между технологическими службами предприятия с заказчиком и проектантами проводится отработка производственной технологичности, где используется имеющаяся документация и создается доказательная система, которая определяет возможность, целесообразность и эффективность изготовления технологическими службами предприятий предлагаемых разработчиком объектов для получения изделия с заданными заказчиком эксплуатационными характеристиками, либо обосновывает целесообразность выделения средств и назначения сроков для создания средств оснащения и проектирования новых комбинированных методов обработки, которые должны обеспечить условия совершенствования эксплуатационных показателей до заданного уровня.

3. При отработке производственной технологичности может проявиться вариант, при котором не оказалось предложений по достижению требуемого уровня эксплуатационных показателей создаваемого или улучшаемого изделия. Тогда может потребоваться корректировка технического задания и документации с количественным обоснованием его по критериям производственной технологичности и необходимость создания новых технологических методов и средств с возможностью увеличении времени на разработку таких технологий с выделением дополнительных средств финансирования на их разработку и освоение в серийном производстве, если это осуществимо на современном этапе развития технологической науки. Тогда количественную оценку сравнивательных показателей производственной технологичности осуществляют по используемому авторами [3] критерию полезности, где при опытном и осваиваемом серийном производстве обосновывается эффективность рассматриваемых технологических приемов и перспективы его расширенного применения в рассматриваемой отрасли и в целом в наукоемком машиностроении. Инструментом оценки служат цифровые технологии и система искусственного интеллекта с использованием базы знаний путем сравнения параметров предлагаемого технологического решения с достоверными результатами, достигнутыми на практике или на уровне изобретений. В текущий момент это возможно сделать в процессе обоснования при проектировании и использовании комбинированных методов обработки (КМО) с широким применением механических и физико-технических воздействий [4, 5].

Механизм управления комбинированными методами обработки в машиностроении

Использование для управления накопленным информационным материалом, обработанным с использованием цифровых технологий и средств искусственного интеллекта, позволяет [2;3] построить механизм освоения процесса по кратчайшим траекториям поиска оптимальных технологических решений с использованием физико-

технических воздействий [4, 5]. В его основе лежит принцип полезности, формально выражаемый зависимостью

$$\begin{aligned} \vec{K}_{o1} \Pi_{o1} &\geq \Pi_{p1}, \\ \vec{K}_{o2} \Pi_{o2} &\geq \Pi_{p2}, \\ \dots \\ \vec{K}_{om} \Pi_{on} &\geq \Pi_{pn}. \end{aligned} \quad (1)$$

С использованием критерия «принцип полезности» [3] можно достаточно убедительно прогнозировать достижимый и предельный уровень воздействия каждого технологического фактора $\Pi_{o1}, \Pi_{o2}, \dots, \Pi_{on}$ (n – количество изучаемых показателей) в создаваемом или модернизированном изделии относительно аналогичного объекта ($\Pi_{p1}, \Pi_{p2}, \dots$), освоенного в современном машиностроении, на получение объединенного технологического показателя ($\Pi_{o1}, \Pi_{o2}, \dots$) и управлять процессом до достижения предельных оценочных показателей в рассматриваемом комбинированном методе обработки. Здесь критерий полезности $K_{o1}, K_{o2}, \dots, K_{on}, K_{d1}, K_{d2}, \dots, K_{dm}$ (m – минимальное количество технологических воздействий, рассматриваемых в работе), численно отражает степень эффективности выбранных мероприятий для повышения эксплуатационных показателей объекта производства до границ не ниже заданных в задании. Это сужает зону поиска оптимального варианта. Требуемая величина критерия зависит от многих факторов, включая характеристики зоны обработки, режимные параметры, наличие и качество технологической базы, организационные мероприятия. Она устанавливается для конкретных выбранных технологических воздействий в комбинированном процессе, где базой служит объем и содержание предшествующего опыта и структура, объем информационной базы.

Управление выбором по предложенному критерию выполняется с учетом вектора положительного или отрицательного воздействия путем сравнения численных значений, полученных для конкретного мероприятия.

$$\begin{aligned} \vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m &\rightarrow \max, \\ \vec{K}_1', \vec{K}_2', \dots, \vec{K}_m' &\rightarrow \min, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m$ – векторы положительных показателей; $\vec{K}_1', \vec{K}_2', \dots, \vec{K}_m'$ – векторные значения, способные вызвать снижение полезности мероприятия, оцениваемому по критерию полезности,

В общем виде система управления с использованием критерия полезности имеет вид:

$$\begin{aligned} \vec{K}_{o1} \Pi_{o1} &\geq \Pi_{p1}, \\ \vec{K}_{o2} \Pi_{o2} &\geq \Pi_{p2}, \\ \dots \\ \vec{K}_{om} \Pi_{on} &\geq \Pi_{pn}. \end{aligned} \quad (3)$$

По зависимости (3) можно разработать целевые модели, учитывающие условия эксплуатации изделий прежде всего научного авиакосмического и энергетического машиностроения, результаты которых послужат базой для совершенствования комбинированных технологических процессов остальных отраслей машиностроения, где граничные условия в основном должны включать только специфичные требования отрасли. Последнее облегчает, ускоряет и удешевляет выбор и использование предлагаемых или создаваемых комбинированных методов обработки [4].

В [2] приведен алгоритм критериальной оценки уровня полезности технологических воздействий на эксплуатационные показатели изделий, позволяющий на примере охлаждаемой лопатки реактивного двигателя (рисунок 1) по модели с использованием принципа полезности доказать эффективность применения для этого случая прошивки отверстий переменного сечения и профиля комбинированной эрозионно-химической обработкой [4, 5].



Рисунок 1 – Рабочие лопатки турбины авиационного двигателя с продольными охлаждающими отверстиями переменного сечения

Результаты освоения процесса прошивки отверстий в детали на рисунке 1 показали не только возможность, но и эффективность выбора по принципу полезности принятого метода комбинированной обработки, значительно расширивший технологические возможности и область использования результатов исследования в других отраслях наукоемкого машиностроения.

Для комбинированной обработки сборных узлов магистралей с давлением до 16 МПа, работающих при температуре более 600К на Нововоронежской атомной электростанции (НВАЭС) с использованием критерия полезности был разработан комбинированный метод чистовой обработки [6] с наклепом мест соединения участков, где с мест повреждения сварных соединений [7] (рисунок 2).

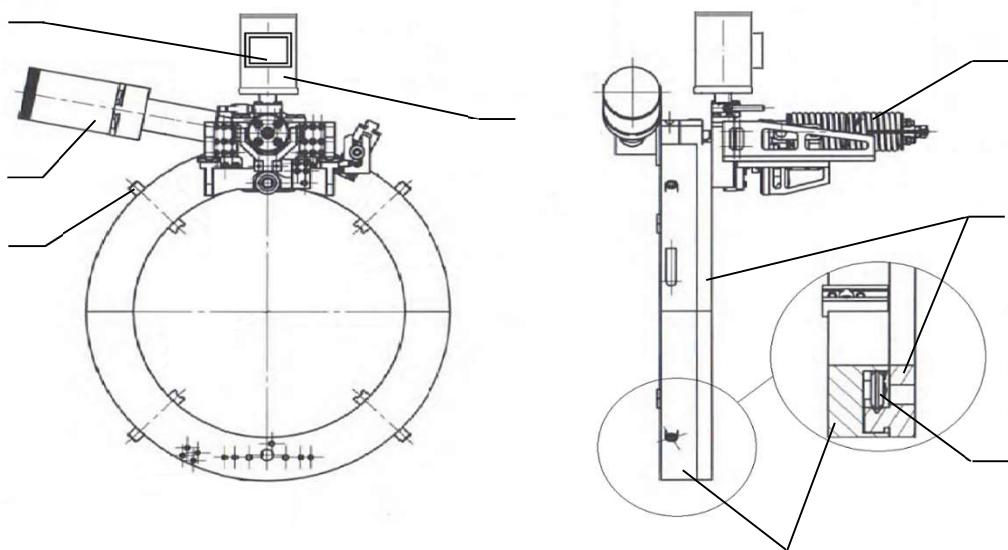


Рисунок 2 – Автоматизированное устройство для поверхностного упрочнения
1 – основание; 2 – блок управления; 3 – направляющие ролики; 4 – планшайба с зубчатым венцом;
5 – опора крепления; 6 – электропривод

Устройство на рисунке 2 предназначено для сокращения времени пребывания персонала в потенциально опасной зоне атомных станций при проведении восстановительного ремонта критических зон трубопроводов без остановки технологических процессов ядерных энергетических установок.

Предлагаемый механизм включает узел кругового движения элемента нагружения, который представляет собой разъемную конструкцию и состоит из блока управления 2; основания 1 с направляющими роликами 3 и планшайбой с зубчатым венцом 4, опор крепления 5 и электропривода 6. За счет применения патента [7] была достигнута возможность автоматизации процесса упрочнения зоны повреждения сварных соединений установкой в конструкцию датчиков положения деформирующего элемента при перемещении его в окружном и осевом направлениях, датчика усилия на деформирующем ролике и шагового

двигателя с возможностью настройки скорости подачи и размера зоны обкатки. В предложенной конструкции был применен реверс перемещения для автоматического прохода датчиков в продольном направлении, управляемых блоком беспроводной передачи и приема информации с помощью программы для ЭВМ.

Использование устройства, полезность которого обоснована по принципу полезности, позволило до полутора раз расширить межремонтный период функционирования агрегатов выработки энергии и получить многомиллионный экономический эффект.

Доказательная база полезности мероприятий по отработке производственной технологичности

Оценка полезности выполнялась по результатам отработки производственной технологичности по результатам испытания образцов, выполненных на режимах предложенных методов комбинированной обработки, включающих механический наклеп поверхностного слоя, аналогичный используемому на трансмиссиях и магистралях с целью обоснования ресурса и назначения расширенных межремонтных периодов магистралей атомных станций, элементов конструкций авиакосмического назначения и других научноемких объектов машиностроения.

Одним из значимых эксплуатационных показателей узлов привода и магистралей, оцениваемых при отработке производственной технологичности по критерию полезности, является достижение требуемой твердости поверхностного слоя после упрочнения, определяющего возможности комбинированных методов обработки по повышению качества, износостойкости, ресурса и надежности изделий. Для этого проводилось сравнение показателей твердости исходной и обработанной поверхности после измерения параметра твердомером с записью диаграмм индентирования и визуализацией полученных отпечатков.

Измерение твердости после комбинированной обработки с упрочнением для магистралей энергетического машиностроения проводилось на образцах из наиболее востребованной углеродистой стали перлитного класса 10ГН2МФА с аустенитной наплавкой (плакирующий слой) из материала 08Х19Н10Г2Б, на примере композитного сварного соединения дыхательного трубопровода энергоблока НВАЭС. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений твердости по Виккерсу (HV30)

Поверхность стали	HV30	Среднее значение HV30
Исходная	193; 187; 188; 189; 189.	189,2
Однопроходная упрочняющая обработка комбинированного технологического процесса	227; 224; 228; 222; 226.	225,4
Двухпроходная обработка	228; 226; 228; 233; 228.	228,6

Для измерения свойств поверхностных слоев после упрочнения более детальные результаты дает измерение микротвердости, выполненное в нашем случае на полуавтоматическом твердомере Zwick ZHV10, результаты которого для рассматриваемого случая приведены в таблицах 2 и 3.

Анализ твердости и микротвердости (таблицы 2 и 3) дает основания для назначения сроков работоспособности изделий в условиях их эксплуатации, научно обоснованного заключения по изменению микроструктуры изучаемого материала. Установлено, что имеет место практически полная идентичность микроструктуры под зоной обработанной поверхности по сравнению с исходной, что доказывает правомерность использования численных показателей критерия полезности при проведении процедуры отработки производственной технологичности.

Таблица 2 – Результаты измерения микротвердости HV0,2 для однопроходного режима с нагрузкой 250 Н

Измеряемая зона образца, мкм, от границы обработанной поверхности	HV0,2	Среднее значение HV0,2
Исходная область металла	207; 210; 212; 212; 210	210±2
60	231; 229; 243; 233; 229	233±6
210	230; 223; 228; 225; 226	227±3
360	228; 217; 218; 232; 223	224±6
510	204; 206; 212; 207; 215	209±5

Таблица 3 – Результаты измерения микротвердости HV0,2 для двухпроходного режима

Измеряемая зона образца, мкм, от границы обработанной поверхности	HV0,2	Среднее значение HV0,2
Исходная	197; 205; 208; 206; 210	205±5
100	225; 246; 228; 237; 240	235±9
235	230; 233; 224; 231; 231	230±3
370	219; 225; 223; 227; 217	222±4
505	202; 215; 217; 210; 218	212±7
640	206; 215; 220; 204; 211	212±7

В таблицах 2 и 3 получены результаты, подтверждающие эффективность комбинированной обработки с механическим упрочнением ударным импульсным методом в один и два прохода. Для этого способом кинетического индентирования шара диаметром 1 мм снята многоцикловая диаграмма, построенная по результатам измерения 3 вдавливаний в материал, обработанный в 1 (1П) и в 2 прохода (2П), что достаточно точно раскрывает механизм одноосного растяжения, показанный на рисунке 3.

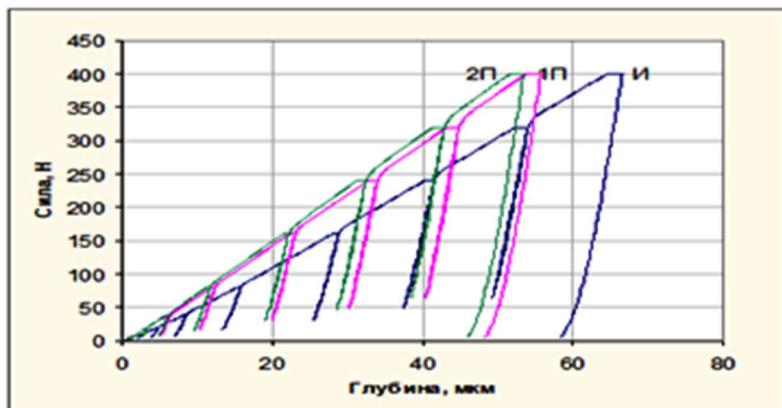


Рисунок 3 – Диаграмма индентирования шара диаметром 1мм в разные участки поверхности образца стали 10ГН2МФА

Из анализа рисунка 3 видно, что результаты обеих проходов практически совпадают, что доказывает правомерность использования для изучаемого материала выбранных режимов и нагрузки при комбинированной обработке с упрочнением. Этим доказано положительное воздействие применяемого в комбинированном процессе механического управляемого наклена [6] на результаты комбинированной обработки по сравнению с аналогичной операцией (М на рисунке 3), выполненной без упрочняющего воздействия, принципиально важного для наукоемкого отечественного машиностроения.

По результатам исследований образцов и опыту применения комбинированных методов обработки с использованием электрических, магнитных полей и упрочняющего

воздействия [4] была создана уточненная модель для описания механизма упруго-пластической деформации материала при различных режимах нагружения путем варьирования глубины упрочнения до момента совпадения по толщине распределения остаточных напряжений, полученных при комбинированной обработке с наклепом, экспериментально ступенчатым рассверливанием, позволяющим создать картину распределения напряжений по глубине материала [6] с использованием позиционирования оси сверла с центром розетки тензорезисторов.

Исследуемые материалы применены в высоконагруженных конструкциях приводов авиакосмических аппаратов и на магистралях энергетических систем в условиях многократных импульсных механических нагрузок, осложненных тепловыми, магнитными и другими воздействиями, поэтому для установления ресурса и межремонтного цикла требуется провести усталостные испытания, которые осуществляются в авиакосмическом машиностроении на базе $2 \cdot 10^7$ циклов [8, 4], а в энергетической отрасли допускается проведение ускоренных испытаний на базе $3 \cdot 10^5$ и при другом количестве циклов, результаты которых приведены на рисунке 4 и доказывают полезность для всех отраслей машиностроения мероприятий по отработке производственной технологичности с использованием комбинированных методов обработки металлических материалов с упрочняющими воздействиями и с численной оценкой их эффективности по критерию полезности [3, 8].

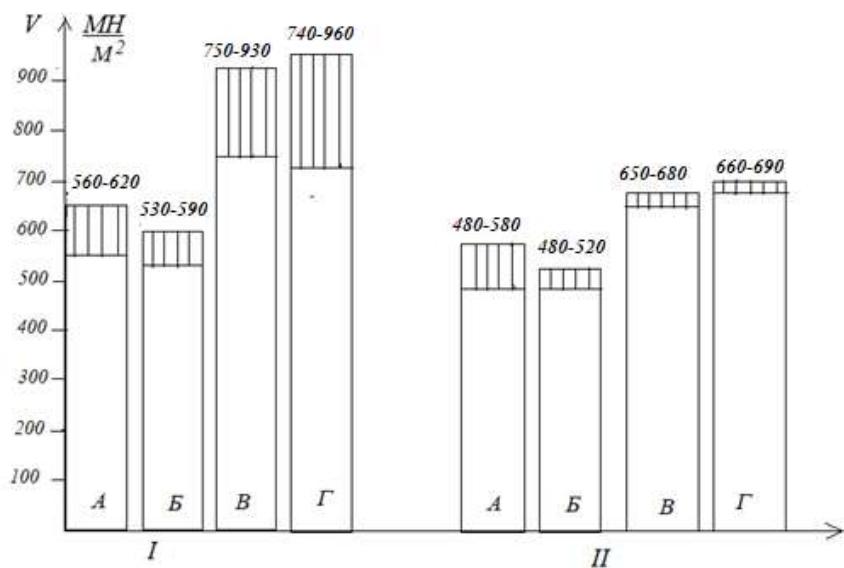


Рисунок 4 – Предел выносливости стальных образцов при усталостных испытаниях на изгиб с кручением:
I – конструкционные легированные стали при испытании на базе $2 \cdot 10^7$ циклов;

II – углеродистые и специальные стали после ускоренных испытаний на базе $5 \cdot 10^5$ циклов.

После: А – механической обработки (шлифования) (МО); Б – комбинированной эрозионно-химической обработки (КМО) без упрочнения; В – МО с ударным механическим поверхностным упрочнением; Г – КМО с механическим упрочнением поверхностного слоя

На рисунке 4 приведены осредненные результаты испытаний конструкционных легированных сталей без термообработки, преимущественно используемых в силовых приводах летательных аппаратов и их двигателях (типа 40ХНМА, 30ХГСА и др.), аналогичные сплавы применяемые на магистралях в авиакосмическом машиностроении и высоколегированные углеродистые стали типа 10ГН2МФА, используемые в магистралях атомных станций.

Испытания материалов для приводов на базе $2 \cdot 10^7$ циклов после комбинированной обработки (КО) с упрочнением не выявили существенных преимуществ известных комбинированных способов. Общий эффект по усталостной прочности находится на одном уровне. Нижняя граница предела выносливости в вариантах I, В и Г практически полностью совпадает (явно находится в зоне разброса результатов испытаний), что подтверждает целесообразность использования в применяемых методах КО механических воздействий для управляемого упрочнения, назначаемого по численным оценкам критерия полезности.

Сопоставление результатов ускоренных испытаний на циклическую прочность исходных образцов и их аналогов по использованию, подвергнутых упрочнению (на рис. 4, II) показало значительное повышение долговечности образцов обеих серий более, чем в 10 раз, полученное при базе испытаний $N = 3,05 \cdot 10^4$ циклов для исходных и $N = 3 \cdot 10^5$ циклов для образцов, подвергнутых управляемому наклепу на глубину до 0,05-0,08 мм. При этом наблюдаемые в случае II, А, Б подповерхностные микротрещины и растрескивания полностью устранились, что даже при ускоренных испытаниях давало возможность пересмотреть ресурс магистралей в сторону его увеличения.

Заключение

1. Создана процедура научно обоснованного выбора и необходимости создания комбинированных технологических процессов с управляемым процессом механического упрочнения поверхностного слоя по критерию полезности, обеспечивающего заданные численные показатели объектов производства авиакосмической и энергетической техники. Работа выполнена для совершенствования изделий на стадиях их создания, модернизации и освоения в серийном производстве. Результаты достигнуты путем изменения свойств металлических материалов при комбинированной обработке внутренних и наружных поверхностей типовых элементов трансмиссий и магистралей, что обеспечивает на стадии отработки производственной технологичности согласование эксплуатационных свойств, полученных в производстве, с уровнем, заданным разработчиком, численно оцениваемым по предложенному принципу полезности и обеспечивающим получение требуемых эксплуатационных показателей изделия.

2. Предложен новый подход в виде критерия полезности к содержанию структуры доказательной базы изготавителя на этапе согласования эксплуатационных показателей новых изделий с разработчиком, обеспечивающий возможность научного обоснования необходимости, объема, стоимости выполнения научных и производственных исследований, опыта эксплуатации и реализации результатов при разработке комбинированных технологических процессов с использованием сочетания механических, тепловых, химических и лучевых воздействий.

3. Для достижения поставленной цели применены новые, на уровне изобретений, созданных в том числе с участием авторов, технологические способы и устройства, эффективность которых доказана в процессе испытаний и внедрения на различных этапах освоения результатов, главным из которых является надежность и ресурс перспективных объектов производства по запросам авиакосмической и энергетической отрасли машиностроения.

4. Обоснован выбор видов и методов испытаний, в том числе усталостной прочности изделий на базе стандартной длительной процедуры и ускоренная методика, учитывающая специфику изучаемых отраслей машиностроения и обеспечивающая надежные показатели работоспособности изделий в отечественном машиностроении за требуемый период эксплуатации между плановыми регламентными работами, сроки которых в результате приведенных мероприятий возросли в несколько раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев А.П, Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии / Ростов-на-Дону: Изд.центр ДГТУ. 1998. – 624 с.
2. Сафонов С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий // Воронеж: Изд.дом ВГУ. 2015. – 232 с.
3. Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Смоленцев Е.В.. Обеспечение качества продукции авиационно-космического машиностроения на этапах отработки технологичности изделий.// Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2025.– №6(168). – С. 11-18.
4. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки // М.: Машиностроение-1. 2005. – 511 с.
5. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина // М.: Дрофа. 2002. – 656 с.
6. Уразов О.В., Данилов А.Д. Технический комплекс для восстановительного ремонта поверхностных повреждений трубопроводов методом поверхностного наклена // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т.18. – № 1. – С. 140-146.
7. Патент на полезную модель № RU 231708 U1, 06.02.2025, МПК B24B 39/04. Автоматизированное устройство для поверхностного упрочнения зоны повреждения сварных соединений / Данилов А.Д., Уразов О.В. // 2025. Бюл. изобр. № 4.
8. Смоленцев В.П. Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей // М.: Машиностроение. 1978. – 176 с.

Уразов Олег Владимирович
инженер-исследователь,
Воронежский государственный
технический университет
(394006, Россия, г. Воронеж,
ул.20 лет Октября, 84),
e-mail: Sergeev-AV@bk.ru

Сафонов Сергей Владимирович
д-р техн. наук, доцент, профессор
кафедры технологии
машиностроения, Воронежский
государственный технический
университет (394006, Россия, г.
Воронеж, ул. 20 лет Октября, 84),
e-mail: Swsafonoff@gmail.com

Смоленцев Владислав Павлович
д-р техн. наук, профессор
Воронежский государственный
технический университет (394006,
Россия, г. Воронеж, ул. 20 лет
Октября, 84),
e-mail: vsmolen@inbox.ru

URAZOV O.V., SAFONOV S.V., SMOLENTSEV V.P.

THE PROCESS OF TESTING THE MANUFACTURABILITY OF HIGH-TECH ENGINEERING PRODUCTS

Annotation: The procedure for testing industrial adaptability is considered, which made it possible to obtain a scientifically based research management mechanism in the field of quality improvement and to obtain a choice or create a new method of combined processing on typical high-tech products of aerospace and energy engineering, the operating conditions of which can serve as a basis for the expanded use of the results obtained in other branches of engineering and technology. The testing procedure is based on the utility criteria proposed by the authors, which implements a scientific approach to selection. technological impacts in combined processing methods to ensure a given level of product quality at all stages of its creation and improvement from experimental to mass-produced products. A testing base has been created to prove the effectiveness of the accepted production adaptability options and the expediency of their expanded use in all branches of engineering, even under the restrictions caused by the sanctions of some foreign countries. In carrying out the work, the authors relied on inventions in the field of technology of combined processing methods, including own patents, protected at the state level. The most advantageous technological processes combining were substantiated mechanical, thermal, chemical, radiation impacts, including various hardening options. The main provisions on product quality management and the justification for the appointment of repair periods have been confirmed in the course of tests performed according to standard and industry programs to the required extent. The results achieved in the process of industrial use of the proposed combined processing methods are presented.

Keywords: adaptability, typical. objects, quality ,tests,scope of application results.

BIBLIOGRAPHY

1. Babichev A.P., Babichev I.A. Fundamentals of vibration technology/Rostov-on-Don: Publishing center of DSTU.1998.624 p.
2. Safonov S.V. Technological support of operational characteristics of products//Voronezh: Publishing House of VSU.2015.232 p.
3. Smolentsev V.P., Safonov S.V., Smolentsev E.V. Ensuring the quality of aerospace engineering products at the stages of testing the manufacturability of products // High-tech technologies in mechanical engineering. 2025.- №. 6(168). – pp. 11-18.
4. Smolentsev E.V. Design of electrical and combined processing methods // M.: Mechanical engineering-1.2005.511 p.
5. Physico-chemical processing methods in the production of gas turbine engines / Edited by B.P. Saushkin // M.: Bustard. 2002. 656 p .
6. Urazov O.V., Danilov A.D. Technical complex for the repair of surface damage to pipelines by surface riveting //Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2022. Vol. 18. №. 1. pp. 140-146.
7. Utility Model patent №. RU 231708 U1, 02/06/2025, IPC B24B 39/04. Automated device for surface hardening of the damage zone of welded joints/Danilov A.D., Urazov O.V.//2025.Byul.izob.№4
8. Smolentsev V.P. Technology of electrochemical treatment of internal surfaces.:Mechanical engineering.1978.176 p..

Urazov Oleg Vladimirovich
Research Engineer, Voronezh State
Technical University (84, 20 let
Oktyabrya str., Voronezh, 394006
Russia),
e-mail:Sergeev-AV@bk.ru

Safonov Sergey Vladimirovich
Doctor of Technical Sciences.PhD,
Associate Professor, Professor of the
Department of Mechanical Engineering
Technology, Voronezh State Technical
University (84, 20 let Oktyabrya str.,
Voronezh, 394006 Russia),
E-Mail:Swsafonoff@gmail.com

Smolentsev Vladislav Pavlovich
Doctor of Technical
Sciences.PhD,Professor,Voronezh State
Technical University (84, 20 let
Oktyabrya str., Voronezh, 394006 Russi ,
e-mail: vsmolen @inbox.ru

© Уразов О.В., Сафонов С.В., Смоленцев В.П., 2025

МОРЕВ П.Г., КАПЫРИН К.И., РАДЧЕНКО С.Ю., ГОЛЕНКОВ В.А.,
ДОРОХОВ Д.О., ГРЯДУНОВ И.М.

ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ МНОГОКРАТНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБКАТКИ СПЛАВА БрОЦС 5-5-5

Аннотация. Исследуются механические свойства литьевого сплава БрОЦС 5-5-5 при интенсивной пластической деформации (ИПД) методом упрочняющей обкатки с закатыванием. Внешний вид образцов, деформированных ИПД и одним из классических способов (осадкой) свидетельствует о существенном различии в механизмах пластической деформации этих двух способов. Измерения микротвёрдости демонстрируют скачок неоднородности материала на определённом этапе деформации. В рамках дислокационной кинетики предлагается математическая модель, учитывающая кристаллографию ГЦК-кристаллов, дробление зерна, двойникование, а также эвтектическую дисперсную примесь. Предлагается закон дробления эвтектической фазы в процессе деформирования, объясняющий результаты измерений микротвёрдости. Рассматривается вопрос численного моделирования многопроходной упрочняющей обкатки с заглаживанием.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, деформационное упрочнение, микротвёрдость, градиентная микроструктура, дислокация, дислокационная кинетика, эвтектика.

1. Введение

Обкатка с закатыванием (deep rolling-burnishing), называемая также упрочняющей валковой штамповкой, представляет собой модификацию традиционной упрочняющей обкатки за счёт добавления закатывающих роликов примерно такого же диаметра [1–8, 30]. Схемы процесса и упрочняющего устройства – обкатника, показаны на рисунке 1. Заготовка закрепляется в специальном контейнере и остаётся неподвижной, а обкатник представляет собой вращающуюся обойму с одним деформирующим (с кольцевым выступом) и двумя закатывающими (без выступа) роликами. При обработке обойма перемещается в осевом направлении. Внешний вид основных узлов установки приводится в [4]. В данном случае обработка подвергается внутренняя поверхность детали, но существует устройство и для упрочнения внешней поверхности [5]. Заглаживающие ролики повышают степень деформации за тот же цикл обработки и снижают неровности поверхности, возникающие после прохождения деформирующего ролика. Обкатка – многопроходный процесс, который формирует микроструктуру с градиентным характером распределения зёрен по размеру в зависимости от глубины. Согласно закону Пётча-Холла, это приводит к противоположному по направлению градиенту микротвёрдости. При достаточно большом числе проходов может быть сформирована ультрамелкозёрненная структура (УМЗ) с размером зерна ≥ 100 нм, либо наноструктура (НС) с размером зерна < 100 нм, что позволяет отнести упрочняющую обкатку с закатыванием к процессам интенсивной пластической деформации (ИПД).

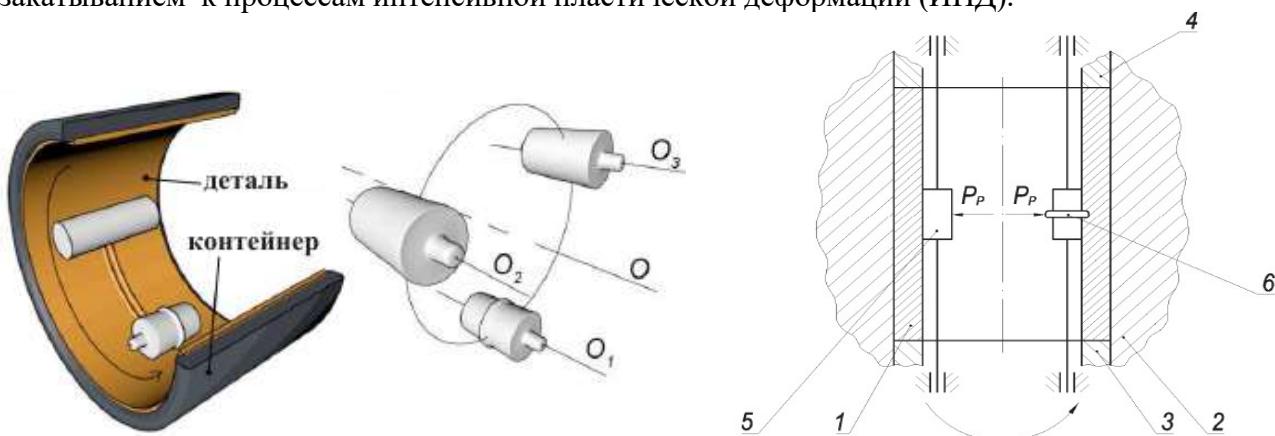


Рисунок 1 – Упрочняющая обкатка с заглаживанием, схема процесса и схема устройства:
1 – заготовка; 2 – контейнер; 3, 4 – осевой прижим; 5 – заглаживающий ролик;
6 – деформирующий ролик

Ранее уже было известно, что упрочняющая обкатка является эффективным способом наведения градиентной микроструктуры в приповерхностном слое, обеспечивая наибольшую глубину этого слоя и наибольшее остаточное сжимающее напряжение по сравнению с другими способами поверхностного упрочнения (дробеструйная обработка, алмазное выглаживание,

лазерная обработка, химические и др. способы упрочнения). Многократная знакопеременная деформация подавляет развитие механической анизотропии и крупномасштабных дефектов, таких как трещины и полости, а остаточное сжимающее напряжение даёт тот же эффект, но уже в период эксплуатации детали. Свойства УМЗ и НС материалов подробно описаны в многочисленных обзорах, где рассмотрены такие эффекты, как дробление зерна, упрочнение, пластичность, двойникование, эволюция текстуры и др. [9–13]. Некоторым принципиальным нерешённым проблемам ИПД-материаловедения посвящена работа [14].

Отметим ещё один крайне важный аспект. Как известно, при ИПД-обработке, в частности БрОЦС 5-5-5, прочность существенно повышается, но падают пластичность и ударная вязкость. Поэтому приходится идти на компромисс: не доводить обработку до последней стадии, чтобы не исчерпать ресурс пластичности. Сравнительно недавно выяснилось, что можно избежать этого компромисса: градиентные структуры дают возможность получить изделия с максимальной прочностью и в то же время достаточным запасом пластичности [15], что также стимулирует интерес к упрочняющей обкатке.

Выбор исследуемого материала обусловлен двумя причинами. Во-первых, сложный химический и фазовый состав позволяет проявиться практически всем известным эффектам ИПД. Во-вторых, в экспериментах наблюдался линейный рост упрочнения при сверхбольших деформациях, чего нельзя пока сказать о других материалах и других способах ИПД.

К сожалению, лишь малая часть обширного массива литературы по ИПД посвящена упрочняющей обкатке, и это несмотря на то, что, помимо перечисленных выше свойств, она даёт сверхбольшие значения как параметра Одквиста ε_p , так и параметра Холомона-Зенера Z , влияющих на процесс дробления зерна. Причин этому несколько. Так, локальное деформирование имеет сложный характер, что делает невозможным прямое определение параметра Одквиста – одного из основных макропараметров ИПД. Единственно доступный способ – численное моделирование. Однако здесь мы сталкиваемся с серьёзными вычислительными проблемами: задача оказывается 3-мерной, требующей сильного сгущения дискретизации в области контакта, причём эта область перемещается практически по всей поверхности детали. В результате численное моделирование многопроходного процесса превращается в трудноразрешимую задачу даже с использованием суперкомпьютеров [16,17]. Следующей проблемой является математическое моделирование эволюции градиентной микроструктуры. Лишь недавно наметились пути её решения. Ключевой оказалась идея ввести в кинетическую теорию дислокаций нелокальные члены, выраженные через градиенты скорости деформации [18]. По-видимому, впервые идея нелокальных эффектов при решении практической задачи была использована Ю. Эстриным для объяснения парадокса упрочнения при кручении под высоким давлением, когда после достаточно большого числа оборотов микротвёрдость образца была повсюду одинакова, несмотря на то, что деформация сдвига существенно зависела от расстояния до центра образца [19].

Настоящая работа посвящена свойствам литой бронзы БрОЦС 5-5-5, обработанной упрочняющей обкаткой с закатыванием и построению кинетической дислокационной модели, позволяющей воспроизвести эти свойства. Статья организована следующим образом. Сначала приводятся результаты экспериментов, демонстрирующих принципиальную разницу между процессом ИПД и классическим тестом на осадку. Затем анализируются результаты измерения микротвёрдости, по которым прослеживается развитие неоднородности материала в ходе обработки. Далее разрабатывается дислокационная кинетическая модель для сплава БрОЦС 5-5-5, которая строится поэтапно добавлением всех известных эффектов, характерных для данного сплава. Наконец, в рамках разработанной модели даётся объяснение основному экспериментальному результату – неограниченному линейному упрочнению БрОЦС 5-5-5 при сверхбольших ИПД-деформациях.

2. Результаты и обсуждение

2.1 Сравнение процессов и результатов деформирования осадкой и упрочняющей обкаткой с заглаживанием

На рисунках 2 и 3 представлены фото образцов чистой меди и литой бронзы БрОЦС 5-5-5, подвергшимся различным процессам пластической деформации, до и после обработки. Уже по внешнему их виду можно сделать вывод о том, что характер пластической деформации, т.е. её носители, их взаимодействие, а также образующиеся в результате дефектные структуры, сильно зависят как от состава материала (химического и фазового), так и от способа деформации.

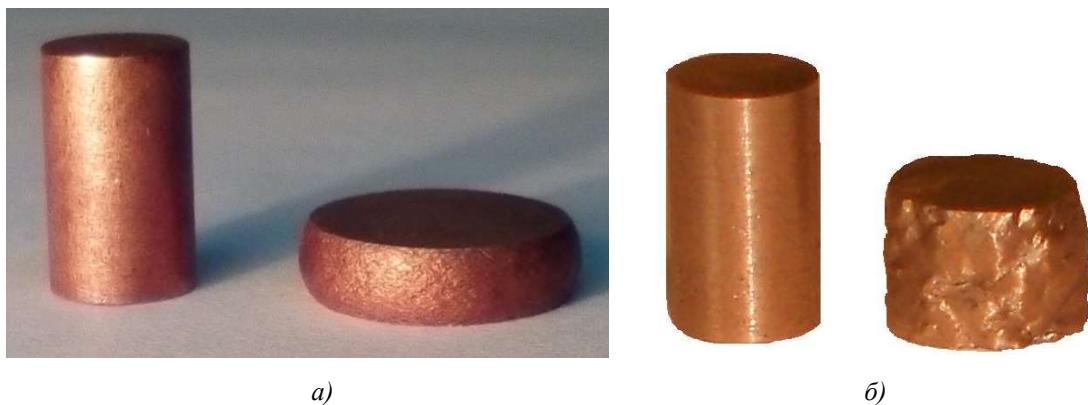


Рисунок 2 – Образцы до и после осадки до логарифмической деформации $\varepsilon = 1,15$ чистой меди (а) и до $\varepsilon = 0,57$ сплава БРОЦС 5-5-5 (б)

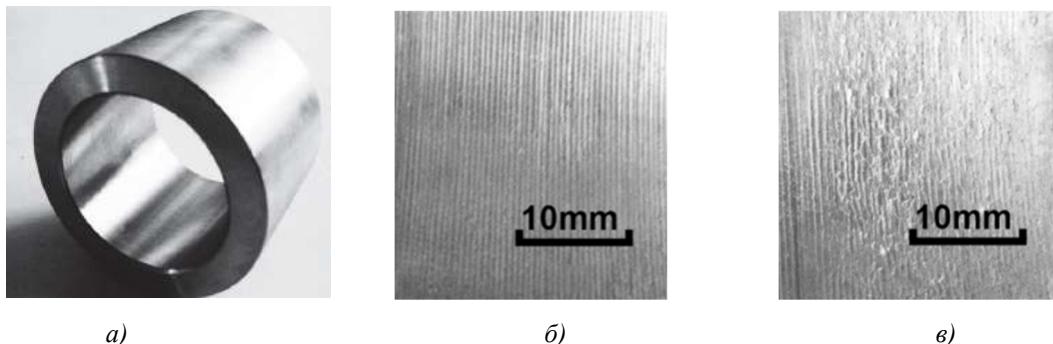


Рисунок 3 – Внешний вид заготовки (а) и внутренней поверхности после упрочняющей обкатки с закатыванием с шагом подачи 0,5 мм/об в зависимости от числа проходов n : $15 \leq n \leq 25$ (б); $n \geq 30$ (в)

Так, чистая медь деформируется за счёт внутриизёрненного дислокационного скольжения, обеспечивающего однородную деформацию даже при больших её значениях, что подтверждает рисунок 2а. Тогда как бронза при осадке уже на ранней стадии проявляет более грубый механизм деформации – полосы сдвига [20], а также развивает неоднородность деформации, которая усиливается и становится заметной даже невооружённым глазом – рисунок 2б. Но та же самая бронза, подвергнутая многократной обкатке-заглаживанию, ведёт себя совершенно иначе – рисунок 3б. Сверхбольшая деформация поверхности (по грубым оценкам, $\varepsilon_p \approx 10,0$) не демонстрирует признаков крупномасштабных дефектов, ведущих к разрушению, в отличие от осадки. Неоднородность деформации снижается, а на повреждённой поверхности при максимальном числе проходов отсутствуют трещины большого размера – рисунок 3в. Это говорит о том, что ИПД выключает грубые механизмы деформации, присущие процессу осадки, и оставляет тонкие, действующие в масштабе зерна (в основном – дислокационное скольжение).

2.2 Эволюция микротвёрдости при упрочняющей обкатке с заглаживанием

Следующая серия результатов посвящена измерению микротвёрдости образцов, обработанных упрочняющей обкаткой-закатыванием [21]. Варьировались число проходов, тогда как глубина внедрения деформирующего ролика оставалась неизменной и равной 0,2 мм. После обработки заготовка извлекалась из контейнера, распиливалась по плоскости симметрии, шлифовалась и исследовалась на микротвёрдомере. Профили микротвёрдости показаны на рисунке 4.

По отклонению экспериментальных точек от построенных графиков можно судить о пространственной неоднородности σ (среднеквадратичного отклонения от аппроксимирующей кривой микротвёрдости). Принимая во внимание исходную неоднородность сплава $\sigma = 5,2$ кгс/мм², можно утверждать, что она остаётся практически постоянной до $n=20$, совершая затем прогрессирующий рост до $\sigma = 19,1$ кгс/мм² при $n=30$ (начало коробления поверхности). Исследование шлифов не показывает наличие крупномасштабных дефектов – предвестников разрушения даже при самой большой достигнутой в экспериментах деформации.

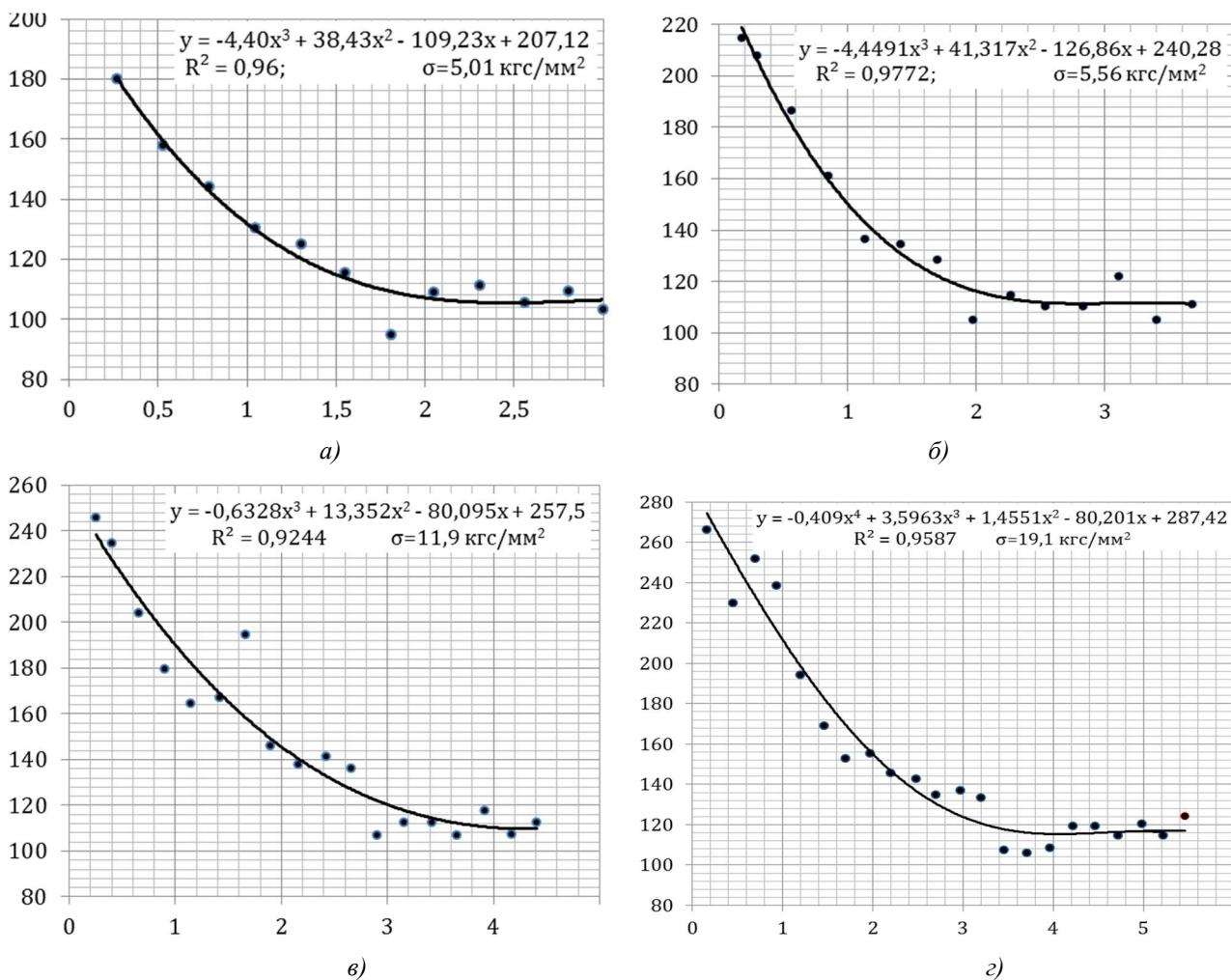


Рисунок 4 – Микротвёрдость HV в зависимости от глубины слоя h при числе проходов: $n=15$ (а); $n=20$ (б); $n=25$ (в); $n=30$ (г); R^2 – достоверность аппроксимации; σ – среднеквадратичное отклонение от аппроксимирующей функции

2.3 Дислокационная кинетика

Можно считать установленным фактом, что основным носителем деформации в процессах ИПД на всех этапах является дислокация [8]. Следовательно, для объяснения свойств исследуемого сплава достаточно построить дислокационную кинетическую модель, учитывающую все особенности ИПД в данном эксперименте. Заметим, что каждая из этих особенностей уже встречалась в предшествующих экспериментах с другими материалами. Поэтому наша задача состоит в том, чтобы скомпоновать эти результаты в единую модель.

Прежде всего, заметим, что для описания градиентных структур потребовалось ввести специальный тип дислокаций – геометрически необходимые (GND – geometrically necessary dislocations), которые обеспечивают непрерывность деформации и тем самым сопряжку зёрен без зазоров и перекрытий. При этом учитывается кристаллография материала, т.е. кинетические уравнения записываются для каждой системы скольжения. Ещё одна особенность – нелокальные градиентные члены, учитывающие неоднородность пластического течения. В итоге уравнения для GND-дислокаций выглядят следующим образом [18]:

$$\dot{\rho}_g^i = \frac{1}{b} \left[\sum_{j=1}^{N_s} d_e^{ji} (\nabla \dot{\gamma}^j \cdot \mathbf{m}^j) + \sum_{j=1}^{N_s} d_s^{ji} (\nabla \dot{\gamma}^j \cdot \mathbf{p}^j) \right] \left(1 - \frac{\rho_g^i}{\bar{\rho}_g^i} \right) \quad (1)$$

где ρ_g^i – скалярная плотность GND; $\bar{\rho}_g^i$ – плотность насыщения GND; $1 \leq i \leq N_d$; N_d – число типов дислокаций (краевых и винтовых); N_s – число систем скольжения; b – длина вектора Бюргерса; $\dot{\gamma}^j$ – деформация сдвига в j -ой плоскости скольжения; \mathbf{m}^j – направляющий вектор в j -ой системе скольжения; $\mathbf{p}^j = \mathbf{m}^j \times \mathbf{n}^j$; \mathbf{n}^j – нормаль к j -ой плоскости скольжения; d_e^{ji} и d_s^{ji} – числовые множители для краевых и винтовых дислокаций. Как показывают расчёты, GND-

дислокации скапливаются у границы зерна, порождая обратное напряжение, ответственное за упрочнение.

Основными носителями пластической деформации являются статистически накапливаемые дислокации (SSD – statistically stored dislocations), распределённые по объёму зерна. При умеренных деформациях их кинетика описывается уравнением Кокса-Мекинга-Эстрина (КМЕ), однако при больших деформациях оно уже не работает, и SSD-дислокации приходится разделять на 2 ансамбля: дислокации ячеек (CD – cell dislocations) с плотностью ρ_c и дислокации стенок ячеек (WD – wall dislocations) с плотностью ρ_w , кинетика которых подчиняется системе уравнений [22,23]:

$$\dot{\rho}_w = \left[\frac{\beta f_c}{bf_w} \sqrt{3\rho_w} + \frac{6\beta f_c^{2/3}}{bdf_w} - k_0 \exp\left(-\frac{p\Omega}{nkT}\right) \left(\frac{\dot{\gamma}^i}{\dot{\gamma}_0^i}\right)^{-1/n} \rho_w \right] \dot{\varepsilon}_p \quad (2)$$

$$\dot{\rho}_c = \left[\frac{\alpha}{b} \sqrt{\frac{\rho_w}{3}} - \frac{6\beta}{bdf_c^{1/3}} - k_0 \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{-1/m} \rho_c \right] \dot{\varepsilon}_p \quad (3)$$

где f_c и f_w – объемные доли дислокаций ячеек и стенок ($f_c+f_w=1$); α , β , k_0 , m , n – параметры материала; d – размер зерна; p – гидростатическая компонента тензора обратного напряжения (back stress); Ω – объём, приходящийся на один атом; $\dot{\varepsilon}_0$ – отсчётная скорость деформации.

Заметим, что система (2) – (3), описывающая SSD-дислокации, не учитывает кристаллографию материала, в отличие от системы (1) для GND-дислокаций. В принципе, учесть этот фактор можно, как это сделано в [18], но и более простой вариант (2) – (3) успешно использовался для моделирования ИПД-процессов [23].

Следующий шаг – это учёт влияния двойников. Как показали эксперименты, при ИПД-обработке бронзы идёт интенсивное двойникование, что в традиционных процессах наблюдается лишь при повышенных температурах. Сплав БрОЦС 5-5-5 содержит 5% цинка, который снижает энергию дефекта упаковки и тем самым способствует двойникованию. Двойники зарождаются в объёме зерна, поэтому не взаимодействуют с дислокациями типов GND и WD. Они практически не дают вклада в деформацию, но способствуют генерации объёмных дислокаций типа CD, поэтому уравнение (3) дополняется ещё одним слагаемым [9]:

$$\dot{\rho}_c = \left[\frac{\alpha}{b} \sqrt{\frac{\rho_w}{3}} - \frac{6\beta}{bdf_c^{1/3}} + \frac{FH(\varepsilon - \varepsilon_0)}{2bh(1-F)} - k \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{-1/n} \rho_c \right] \dot{\varepsilon}_p \quad (4)$$

где H – параметр материала; ε_0 – деформация начала двойникования; h – толщина двойника; $F=F(t)$ – объёмная доля двойников в зависимости от времени. Вычисление функции $F(t)$ представляет сложную задачу, основанную на статистическом подсчёте числа зёрен, готовых к двойникованию, на основе формулы:

$$\tau = \frac{Gsh}{2d} \quad (5)$$

(здесь τ – сдвиговое напряжение двойникования, G – модуль сдвига, s – сдвиговая деформация двойника), а также функции распределения зёрен по размеру [24]. Эта задача решена для одноосного растяжения и очевидно, что предложенную методику можно распространить на другие случаи.

Наконец, необходимо учесть многофазную микроструктуру сплава. Она состоит из 3 компонент: CuSn, CuZn и SnPb, которые отчётливо проявляются у литой бронзы в оптическом микроскопе в виде светлых дендритов, твёрдого раствора тёмного цвета и вкраплений эвтектической фазы SnPb. При отжиге дендриты растворяются, и тогда сплав можно считать 2-фазным, состоящим из твёрдого раствора и эвтектики SnPb. В любом случае сплав состоит из твёрдой компоненты и мягкой дисперсной добавки (эвтектики), обладающей малым сопротивлением сдвига по сравнению с твёрдым раствором. В этом случае критическое сдвиговое напряжение получает добавку $\pi RE_s/bL$ в каждой плоскости скольжения, где R – радиус частицы примесной фазы, E_s – поверхностная энергия фазы (аналог поверхностного натяжения жидкости), L – среднее расстояние между частицами [9] со ссылками на [25,26]. Заметим, что критическое сдвиговое напряжение, вызывающее движение дислокаций в i -ой системе скольжения, обычно складывается из 4 слагаемых:

$$\tau_c^i = \tau_0^i + \tau_1^i + \tau_2^i + \tau_3^i \quad (6)$$

где τ_0^i – сила трения решётки, вызванная барьером Пайерлса; τ_1^i – сопротивление скольжению дислокаций, связанное с границей зерна; τ_2^i – сопротивление дислокаций леса; τ_3^i – обратное напряжение (back stress), вызванное приграничными дислокациями типа GND. Эти слагаемые имеют вид [18]:

$$\tau_1^i = \frac{k_{HP}}{\sqrt{d}}; \tau_2^i = \chi G b \sqrt{\rho_s^i + \rho_g^i}; \tau_3^i = \frac{G b h \rho_g^i}{\pi(1-\nu)} \quad (7)$$

где k_{HP} – коэффициент Холла-Пётча; h – среднее расстояние между полосами скольжения в приграничном скоплении GND дислокаций; ν – коэффициент Пуассона. Таким образом, учитывая добавку, вносимую дисперсными частицами эвтектики, заменяем (6) на выражение

$$\tau_c^i = \tau_0^i + \tau_1^i + \tau_2^i + \tau_3^i + \frac{\pi R E_s}{b L} \quad (8)$$

Важно отметить, что R и L меняются по ходу деформации, и чтобы понять, как это происходит, следует привести простую формулу, подтверждённую экспериментально [27] и используемую при моделировании кристаллов меди и никеля:

$$d = d_0 + \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_1 - \varepsilon_0} (d_1 - d_0) \quad (9)$$

где d_0 и ε_0 относятся к началу процесса, а d_1 и ε_1 – к концу. Проследим, как меняется каждое слагаемое в (8) при сверхбольших деформациях. При этом плотность дислокаций, как GND, так и SSD, достигает насыщения. Для GND-дислокаций этот факт отмечен в [18]. Что касается SSD, то можно привести следующие соображения. Система (2) – (3) имеет стационарное решение, которое получается при условии $\dot{\rho}_c = \dot{\rho}_w = 0$ и даёт асимптотические значения ρ_c и ρ_w . Достигается ли такое состояние в эксперименте? Наблюдения показали, что, действительно, дислокационная структура при достаточно большом ε_p как бы замирает: перестают меняться объёмная доля стенок ячеек f_w , толщина стенок h_w и размер зерна d [23]. Численное моделирование ИПД подтверждает это: при кручении под высоким давлением плотности дислокаций типов CD и WD выходят на плато [19]. Следовательно, τ_2^i и τ_3^i перестают меняться. Дроблению зерна противодействует процесс динамической рекристаллизации, поэтому размер зерна d , а с ним и τ_1^i , стабилизируются; τ_0^i вообще не меняется в ходе деформации. Что же касается эвтектической фазы, то её частицы будут продолжать дробиться и при больших деформациях, что подтверждается экспериментально [28,29], и естественно предположить, что это дробление также будет подчиняться линейному закону (9). Но частицы примеси, однажды разделившись, уже не смогут сойтись, если будут достаточно удалены друг от друга пространственно. Таким образом, дробление эвтектической фазы будет проходить уже без обратной рекристаллизации, а упрочнение будет определяться исключительно последним слагаемым в (8), поэтому проследим, как меняется каждая переменная, входящая в это слагаемое. Для простоты считаем, что все частицы эвтектики одинаковы, имеют форму шара и распределены равномерно по пространству. Пусть R_0 и R_1 – их начальный и конечный радиусы; L_0 и L_1 – начальное и конечное межчастичные расстояния; ρ_0 и ρ_1 – начальная и конечная плотности дисперсных частиц эвтектики (под плотностью понимается число частиц на единицу объёма). Назовём $n = R_0/R_1$ числом дробления. Тогда $\rho_1 = \rho_0 n^3$, откуда, учитывая $1/L_0 = \sqrt[3]{\rho_0}$, получаем

$$1/L_1 = \sqrt[3]{\rho_1} = \sqrt[3]{\rho_0} n = n/L_0$$

Поэтому $R_0/R_1 = L_0/L_1$, т.е. отношение R/L в последнем слагаемом (8) поддерживается постоянным в процессе деформации. Далее, площадь S поверхности всех частиц эвтектики на единицу объёма есть, очевидно,

$$S = 4\pi \rho R^2 = 4\pi \rho \frac{R^3}{R} = 3 \frac{\rho V}{R} = 3 \frac{\nu}{R}$$

где V – объём дисперсной частицы, ν – объёмная доля эвтектической фазы. Если обозначить через ε_s поверхность плотность энергии эвтектической фазы, то

$$E_s = S \varepsilon_s = 3 \frac{\nu \varepsilon_s}{R}$$

Из вышесказанного следует, что последнее слагаемое (8), определяющее упрочнение при больших деформациях, меняется как R^{-1} . Если принять, что $R(\varepsilon)$ меняется по такому же линейному закону, что и $d(\varepsilon)$ (см. (9)), то тогда $E_s(\varepsilon)$ меняется по гиперболическому закону – рисунок 5а. Учитывая, что отношение R/L останется неизменным независимо от вида функции $R(\varepsilon)$, последнее слагаемое в (8), а с ним и сдвиговое напряжение текучести τ_c^i и, следовательно, прочностные свойства будут расти по гиперболическому закону с увеличивающимся темпом – рисунок 5а. Экспериментальные данные, представленные на рисунке 6 и 7, не подтверждают такой вид зависимости. Напротив, они демонстрируют линейный рост микротвёрдости с увеличением деформации. Заметим, что видимое отклонение от линейного закона на рисунке 6 при глубине слоя $h=1\text{мм}$ и $h=2\text{мм}$ обусловлено недостаточностью статистических данных. Регрессионный анализ – см. рисунок 7 – делает это отклонение гораздо менее заметным. И если принять, что, наоборот, $R(\varepsilon)$ меняется по гиперболическому закону

$$R = \frac{R_0 R_1 (\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{R_0 (\varepsilon - \varepsilon_0) + R_1 (\varepsilon_1 - \varepsilon)} \quad (10)$$

то $R^{-1}(\varepsilon)$, а с ней и $S(\varepsilon)$, $E_s(\varepsilon)$, $\tau_c^i(\varepsilon)$ будут меняться по линейному закону, что и объясняет линейный рост упрочнения в измерениях микротвёрдости на рисунке 6 и 7. Т.о., закон дробления эвтектической фазы БрОЦС 5-5-5 при ИПД методом упрочняющей обкатки-заглаживания носит гиперболический характер (10).

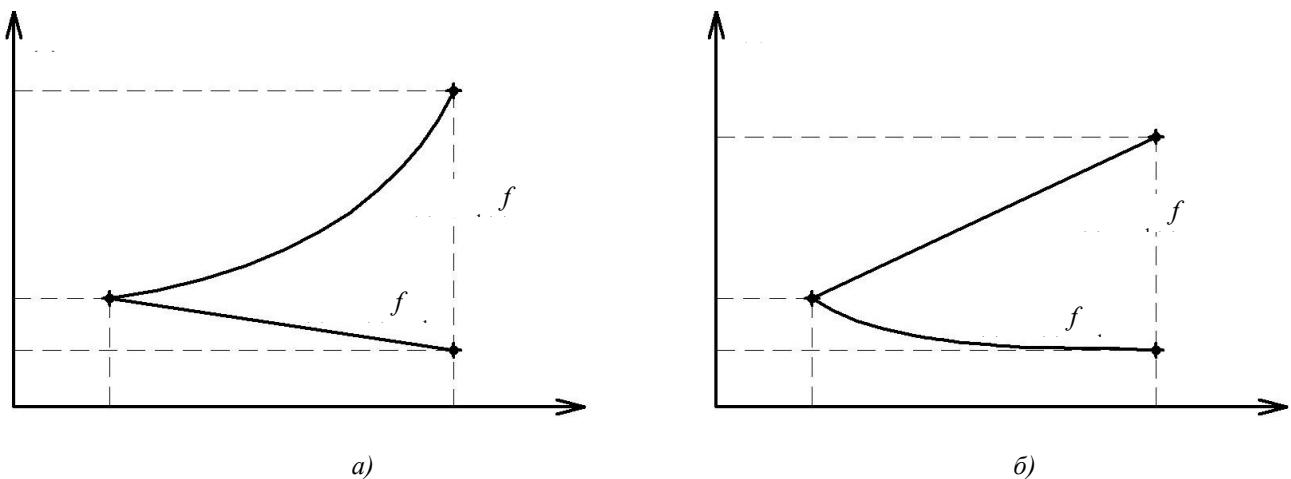


Рисунок 5 – Обратный размер частиц эвтектики при линейном (а) и гиперболическом (б) законе дробления

2.5 Проблемы численного моделирования

Численное моделирование процесса упрочняющей обкатки с закатыванием должно выполняться как на микроскопическом уровне, так и на макроскопическом. Математическая модель микроуровня – это система обыкновенных дифференциальных уравнений (1), (3) – (5), (7) – (10), которая легко решается численными методами. Однако на макроуровне мы сталкиваемся с контактной задачей на локальную деформацию с перемещающейся зоной контакта. Эта зона является концентратором напряжения, что требует сильного сгущения дискретизации. Учитывая многопроходность процесса, задача превосходит возможности современных суперкомпьютеров и решается в упрощённой постановке, что может привести к потере важной информации [16,17]. Эту проблему можно обойти, если выполнять обработку детали роликом большого диаметра. В этом случае пятно контакта будет иметь форму сильно вытянутого в направлении прокатки овала. Тогда течение металла пойдёт преимущественно в осевом направлении, как и предполагается в осесимметричных задачах. Поэтому 3-мерную задачу можно было бы свести к 2-мерной осесимметричной, что радикально сократило бы время счёта. В настоящее время подобные эксперименты находятся в стадии планирования, поэтому проверка и подгонка предложенной в данной работе дислокационной модели – предмет будущих исследований.

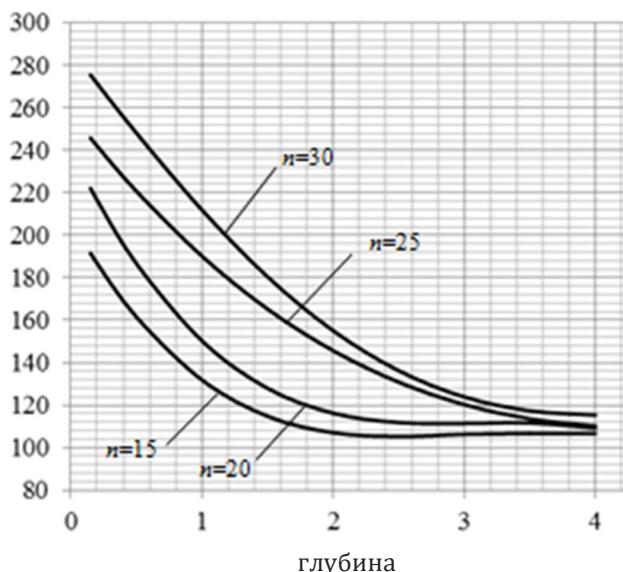


Рисунок 6 – Измеренные профили микротвёрдости HV при разном числе проходов n

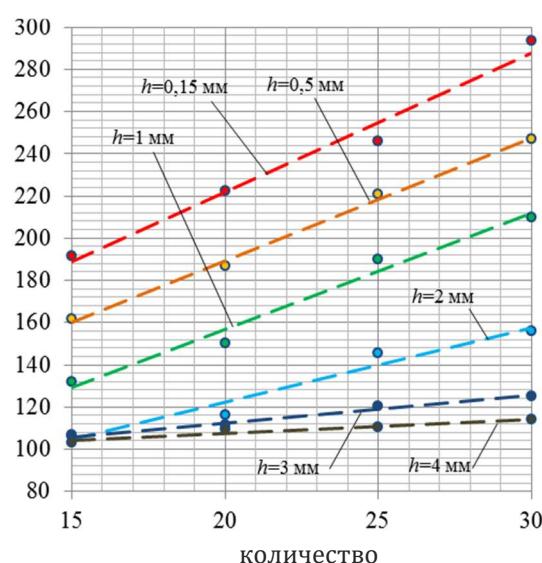


Рисунок 7 – Микротвёрдость HV в зависимости от количества проходов n на глубине слоя h

3. Выводы

1. Обкатка с закатыванием (упрочняющая валковая штамповка) формирует градиентную микроструктуру в приповерхностном слое глубиной от 2 до 4 мм; при увеличении числа проходов наблюдался значительный пропорциональный рост упрочнения (микротвердости HV) при относительно медленном росте градиента упрочнения.

2. Фотографии образцов после упрочняющей обкатки с закатыванием и деформирования одним из классических способов (осадкой) показывают существенное различие в результатах деформации, которое можно объяснить только на уровне микроструктуры.

3. Измерения микротвердости показали, что среднеквадратичное отклонение её профиля от аппроксимирующей кривой, характеризующее неоднородность материала, остаётся практически равным исходному вплоть до 20 проходов, затем подскакивает приблизительно вдвое при $n=25$ и $n=30$ (коробление поверхности).

4. Литейная бронза БрОЦС 5-5-5 при обработке упрочняющей обкаткой- закатыванием демонстрирует неограниченный в пределах эксперимента линейный рост микротвёрдости; в силу особенностей фазовой структуры, другие сплавы не показывают такого роста.

5. Предложены уравнения дислокационной кинетической теории ИПД, учитывающие как кристаллографию материала, так и такие специфические для низкотемпературной ИПД эффекты, как формирование УМЗ-структур, деформационное двойникование и примесную эвтектику; в рамках предложенного подхода находит объяснение неограниченный линейный рост упрочнения бронзы БрОЦС 5-5-5 при обработке упрочняющей обкаткой с закатыванием.

6. С целью радикального сокращения объёма вычислений предложен альтернативный подход к численному решению соответствующей 3-мерной контактной задачи, который, однако, требует дополнительных экспериментов с деформирующим роликом достаточно большого диаметра.

Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-01466-23-07 на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов от 24.11.2023 г., проект № FSGN-2023-002 (1023082800024-8-1.3.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. К вопросу о повышении эксплуатационных характеристик полых осесимметричных деталей машин методами интенсивной пластической деформации//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии 296 № 6 (2012) 71–77.
- Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Морев П.Г., Грядунов И.М., Голенков В.А. Математическая модель упрочняющей обработки внутренней поверхности деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии 301 № 5 (2013) 40–47.

3. Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Распределение микротвердости по сечению изделий при упрочнении в условиях комплексного локального нагружения// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии 324 № 4-1 (2017) 132–138.
4. Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Экспериментальное исследование упрочняющей обработки внутренней поверхности вкладышей подшипников скольжения в условиях комплексного локального нагружения очага деформации// Мир транспорта и технологических машин 42 № 3 (2013) 67–76.
5. Дорохов Д.О. Управляемое формирование механических свойств в изделиях методами комплексного локального деформирования// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии 288 № 4 (2011) 76–84.
6. Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Создание градиентных наноструктур в осесимметричных изделиях// Наноинженерия 11 № 5 (2012) 18–22.
7. Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорофеев О.В., Дорохов Д.О. Создание градиентных структур на основе метода валковой штамповки// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии 275 № 3 (2009) 42–46.
8. Жиряков Е.В., Дорохов Д.О. Определение истинной деформации при локальном деформировании// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии 280 № 2-2 (2010) 12–15.
9. Vinogradov A., Estrin Yu. Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation// Progress in Materials Science 95 (2018) 172–242.
10. Azeddine H., Bradai D., Baudin T., Langdon T. Texture evolution in high-pressure torsion processing// Progress in Materials Science 125 (2022) 100886.
11. Ovid'ko I.A., Valiev R.Z., Zhu Y.T. Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials// Progress in Materials Science 94 (2018) 462–540.
12. An X.H., Wu S.D., Wang Z.G., Zhang Z.F. Significance of stacking fault energy in bulk nanostructures materials: Insight from Cu and its binary alloys as model systems// Progress in Materials Science 101 (2019) 1–45.
13. Sakai T., Belyakov A., Kaibyshev R., Miura H., Jonas J. Dynamic and post-dynamic recrystallisation under hot, cold, and severe plastic deformation// Progress in Materials Science 60 (2014) 130–207.
14. Морев П.Г., Капырин К.И., Радченко С.Ю., Голенков В.А. Современные проблемы технологии ИПД (по материалам периодики) // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии 6 (362) (2023) 28–42.
15. Hasan M.N., Liu Y.F., An X.H., Gu J., Song M., Cao Y., Li Y.S., Zhu Y.T., Liao X.Z. Simultaneously enhancing strength and ductility of a high-entropy alloy via gradient hierarchical microstructures. Int. J. Plast. 123 (2019) 178–195.
16. Морев П.Г., Гордон В.А. Конечный элемент для осесимметричных задач с усреднением в узлах и стабилизацией// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии 326 №6 (2017) 29–35.
17. Морев П.Г., Гордон В.А. Численное моделирование упрочняющей глубокой прокатки поверхности с помощью осесимметричных конечных элементов с усреднением в узлах и стабилизацией// “Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики”: Сборник трудов Международной научно-технической конференции. Воронежский государственный университет. 2017. С. 1178–1186.
18. Rui Yuan Effects of grain size, texture and grain growth capacity gradients on the deformation mechanisms and mechanical properties of gradient nanostructured nickel// Acta Mech 234 (2023), 4147–4181.
19. Estrin Y., Molotnikov A., Davies C., Lapovok R. Strain gradient plasticity modelling of high-pressure torsion// J. Mech. Phys. Solids 56 (2008) 186–202.
20. Morrev P.G., Kapyrin K.I., Kurdyumova L., Kulikov I. Yu, Tatarchenkov N.V., Gordon On construction of SPD stress-strain curve for bronze Cu85–Pb5–Sn5–Zn5// Materials Science & Engineering A 764 (2019) 137889.
21. Morrev P.G., Kapyrin K.I., Gryadunov I.M., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Gordon V.A. Towards the Problem of Construction an SPD Stress-Strain Curve for Low-Plastic Materials// Key Engineering Materials 839 (2020) 189–195.
22. Toth L., Molinari A., Estrin Y. Strain hardening at large strains as predicted by dislocation based polycrystal plasticity model// Journal of Engineering Materials and Technology 124 (2002) 71–77.
23. McKenzie P.W.J., Lapovok R., Estrin Y. The influence of back pressure on ECAP processed AA 6016: modeling and experiment// Acta Materialia 55 (2007) 2985–2993.
24. Vinogradov A., Vasilev E., Merson D., Estrin Yu. A Phenomenological Model of Twinning Kinetics// Advanced engineering materials 19 №1 (2017) 1600092.
25. Martin JW. Precipitation hardening. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 1998.
26. Nembach E. Particle strengthening of metals and alloys. New York: Wiley; 1997.
27. Fang T.H., Li W.L., Tao N.R., Lu K. Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper// Science 331 (2011) 1587.
28. Gryadunov I. M., Radchenko S. Yu., D. O. Dorokhov D. O., Morrev P. G. Deep Hardening of Inner Cylindrical Surface by Periodic Deep Rolling-Burnishing Process// Modern Applied Science 9 №9 (2015) 251–258.
29. Gupta R., Srivastava S., Kumar N., Panthi S. High leaded tin bronze processing during multi-directional forging: Effect on microstructure and mechanical properties// Materials Science & Engineering A 654 (2016) 282–291.
30. Golenkov V. A., S. Radchenko Yu., Dorokhov D. O. Theory and Technology of Roll Stamping. Springer Nature Switzerland AG; 2022.

Морев Павел Геннадьевич

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл. Кандидат физико-математических наук, с.н.с. НОЦ «Математическое моделирование состояний и процессов городской среды» 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29 E-mail: paulorel@mail.ru

Капырин Константин Игоревич

Мценский филиал ФГБОУ ВПО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Мценск. Кандидат технических наук, доцент кафедры инженерно-технических дисциплин 303030, Орловская обл., г. Мценск, ул. Тургенева, д. 196 E-mail: kostik72@inbox.ru

Радченко Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл Доктор технических наук, профессор, проректор 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29 E-mail: sur@ostu.ru

Голенков Вячеслав Александрович

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Доктор технических наук, профессор, руководитель научной школы 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29 E-mail: president@ostu.ru

Дорохов Даниил Олегович

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиностроения 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29 E-mail: ddostu@mail.ru

Грядунов Игорь Михайлович

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел Кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления и кибернетики 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29 E-mail: fry14@yandex.ru

MORREV P.G., KAPYRIN K.I., RADCHENKO S.YU., GOLENKOV V.A.,
DOROHOV D.O. GRYADUNOV I.M.

PLASTIC DEFORMATION FEATURES OF CAST ALLOY 85Cu5Zn5Sn5Pb UNDER MULTI-PASS DEEP ROLLING-BURNISHING WORKING

Abstract. Mechanical properties of cast alloy 85Cu5Zn5Sn5Pb under severe plastic deformation by deep rolling-burnishing working (DRB) are studied. The show of samples, treated by DRB and by one of classical methods (compression test), points to essential difference between mechanisms of plastic deformation in these two processes. Microhardness measurements demonstrate the non-uniformity leap at certain stage of deformation. In the dislocation kinetics framework, a mathematical model taking into account the FCC crystallography, grain refinement, twinning, and eutectic dispersive impurity is build. A grain refinement law of the eutectic phase under SPD is proposed. The issue of numerical simulation of multi-pass deep rolling-burnishing is discussed.

Keywords: severe plastic deformation, work hardening, microhardness, gradient microstructure, dislocation, dislocation kinetics, eutectics.

BIBLIOGRAPHY

1. Golenkov V.A., Radchenko S.YU., Dorohov D.O., Gryadunov I.M. K voprosu o povyshenii ekspluatacionnykh harakteristik polyy osesimmetrichnykh detalej mashin metodami intensivnoj plasticheskoy deformacii//Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii 296 № 6 (2012) 71–77.
2. Radchenko S.YU., Dorohov D.O., Morev P.G., Gryadunov I.M., Golenkov V.A. Matematicheskaya model' uprochnyyayushchej obrabotki vnutrennej poverhnosti detalej tipa vtulok intensivnoj plasticheskoy deformacij v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya ochaga deformacii// Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii 301 № 5 (2013) 40–47.
3. Radchenko S.YU., Dorohov D.O., Gryadunov I.M. Raspredelenie mikrotverdosti po secheniyu izdelij pri uprochnenii v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya// Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii 324 № 4-1 (2017) 132–138.
4. Radchenko S.YU., Dorohov D.O., Gryadunov I.M. Eksperimental'noe issledovanie uprochnyyayushchej obrabotki vnutrennej poverhnosti vkladyshej podshipnikov skol'zheniya v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya ochaga deformacii// Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin 42 № 3 (2013) 67–76.
5. Dorohov D.O. Upravlyayemoe formirovaniye mekhanicheskikh svojstv v izdeliyah metodami kompleksnogo lokal'nogo deformirovaniya// Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii 288 № 4 (2011) 76–84.
6. Golenkov V.A., Radchenko S.YU., Dorohov D.O., Gryadunov I.M. Sozdanie gradientnyh nanostruktur v osesimmetrichnykh izdeliyah// Nanoindzheneriya 11 № 5 (2012) 18–22.
7. Golenkov V.A., Radchenko S.YU., Dorofeev O.V., Dorohov D.O. Sozdanie gradientnyh struktur na osnove metoda valkovoj shtampovki// Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii 275 № 3 (2009) 42–46.
8. ZHiryakov E.V., Dorohov D.O. Opredelenie istinnoj deformacii pri lokal'nom deformirovaniyu// Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii 280 № 2-2 (2010) 12–15.
9. Vinogradov A., Estrin Yu. Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation// Progress in Materials Science 95 (2018) 172–242.

10. Azzeddine H., Bradai D., Baudin T., Langdon T. Texture evolution in high pressure torsion processing// Progress in Materials Science 125 (2022) 100886.
11. Ovid'ko I.A., Valiev R.Z., Zhu Y.T. Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials// Progress in Materials Science 94 (2018) 462–540.
12. An X.H., Wu S.D., Wang Z.G., Zhang Z.F. Significance of stacking fault energy in bulk nanostructures materials: Insight from Cu and its binary alloys as model systems// Progress in Materials Science 101 (2019) 1–45.
13. Sakai T., Belyakov A., Kairyshev R., Miura H., Jonas J. Dynamic and post-dynamic recrystallisation under hot, cold, and severe plastic deformatios// Progress in Materials Science 60 (2014) 130–207.
14. Morev P.G., Kapyrin K.I., Radchenko S.YU., Golenkov V.A. Sovremennye problemy tekhnologii IPD (po materialam periodiki) // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii 6 (362) (2023) 28–42.
15. Hasan M.N., Liu Y.F., An X.H., Gu J., Song M., Cao Y., Li Y.S., Zhu Y.T., Liao X.Z. Simultaneously enhancing strength and ductility of a high-entropy alloy via gradient hierarchical microstructures. Int. J. Plast. 123 (2019) 178–195.
16. Morev P.G., Gordon V.A. Konechnyj element dlya osesimmetrichnyh zadach s usredneniem v uzlah i stabilizacij// Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii 326 №6 (2017) 29–35.
17. Morev P.G., Gordon V.A. CHislennoe modelirovanie uprochnyayushchej glubokoj prokatki poverhnosti s pomoshch'yu osesimmetrichnyh konechnyh elementov s usredneniem v uzlah i stabilizacij// "Aktual'nye problemy prikladnoj matematiki, informatiki i mekhaniki": Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Voronezhskij gosudarstvennyj universitet. 2017. S. 1178–1186.
18. Rui Yuan Effects of grain size, texture and grain growth capacity gradients on the deformation mechanisms and mechanical properties of gradient nanostructured nickel// Acta Mech 234 (2023), 4147–4181.
19. Estrin Y., Molotnikov A., Davies C., Lapovok R. Strain gradient plasticity modelling of highpressure torsion// J. Mech. Phys. Solids 56 (2008) 186–202.
20. Morev P.G., Kapyrin K.I., Kurdyumova L., Kulikov I. Yu., Tatarenkov N.V., Gordon On construction of SPD stress-strain curve for bronze Cu85–Pb5–Sn5–Zn5// Materials Science & Engineering A 764 (2019) 137889.
21. Morev P.G., Kapyrin K.I., Gryadunov I.M., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Gordon V.A. Towards the Problem of Construction an SPD Stress-Strain Curve for Low Plastic Materials// Key Engineering Materials 839 (2020) 189–195.
22. Toth L., Molinari A., Estrin Y. Strain hardening at large strains as predicted by dislocation based polycrystal plasticity model// Journal of Engineering Materials and Technology 124 (2002) 71–77.
23. McKenzie P.W.J., Lapovok R., Estrin Y. The influence of back pressure on ECAP pro-cessed AA 6016: modeling and experiment// Acta Materialia 55 (2007) 2985–2993.
24. Vinogradov A., Vasilev E., Merson D., Estrin Yu. A Phenomenological Model of Twinning Kinetics// Advanced engineering materials 19 №1 (2017) 1600092.
25. Martin JW. Precipitation hardening. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 1998.
26. Nembach E. Particle strengthening of metals and alloys. New York: Wiley; 1997.
27. Fang T.H., Li W.L., Tao N.R., Lu K. Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nanograined copper// Science 331 (2011) 1587.
28. Gryadunov I. M., Radchenko S. Yu., D. O. Dorokhov D. O., Morev P. G. Deep Hardening of Inner Cylindrical Surface by Periodic Deep Rolling-Burnishing Process// Modern Applied Science 9 №9 (2015) 251–258.
29. Gupta R., Srivastava S., Kumar N., Panthi S. High leaded tin bronze processing during multidirectional forging: Effect on microstructure and mechanical properties// Materials Science & Engineering A 654 (2016) 282–291.
30. Golenkov V. A., S. Radchenko Yu., Dorokhov D. O. Theory and Technology of Roll Stamping. Springer Nature Switzerland AG; 2022.

Morrev Pavel Gennadievich

Oryol State University named after I.S. Turgenev, Ph.D., senior researcher of Scientific Educational Center «Mathematical simulation of states and processes in urban environment»
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: paulorel@mail.ru

Kapyrin Konstantin Igorovich

Mtsensk Branch of Oryol State University named after I.S. Turgenev, Ph.D., Docent department of the general engineering disciplines
303030, The Oryol region, Mtsensk, street Turgeneva, 196
E-mail: kostik72@inbox.ru

Radchenko Sergey Yurievich

Oryol State University named after I.S. Turgenev Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: sur@ostu.ru

Golenkov Vyacheslav Aleksandrovich

Oryol State University named after I.S. Turgenev Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Scientific School
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: president@ostu.ru

Dorohov Danila Olegovich

Oryol State University named after I.S. Turgenev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: ddostu@mail.ru

Gryydunov Igor Mikhailovich

Oryol State University named after I.S. Turgenev, Ph.D., Docent department of the automatic systems of control and kybernetics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: fry14@yandex.ru

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА

УДК 004.932.2, 004.021

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-374-6-75-84

НЕЧАЕВ А.А., ПОЛЯКОВ Р.Н.

ОБЗОР МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ. ЧАСТЬ 2

Аннотация. В статье приведён обзор задачи обнаружения (детектирования) объектов на изображении. Рассмотрено несколько вариантов постановки задачи, классификация методов её решения (на определённые группы), описаны основные существующие методы решения. Рассмотрены достоинства и недостатки различным методов, приведено сравнение различных подходов, выделены их достоинства и недостатки. В статье рассмотрено развитие методов детектирования объектов за последние приблизительно сорок лет. Описаны основные идеи работы как нейронных сетей в целом, так и свёрточных нейронных сетей в частности (так как наибольшей производительности в детектировании объектов достигли именно те методы, которые используют свёрточные нейронные сети). Кратко рассмотрена задача отслеживания (или трекинга) объектов, указаны некоторые практические случаи, в которых задачи детектирования или трекинга объектов могут возникать. Статья публикуется в двух частях.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, детектирование объектов, обнаружение объектов, трекинг объектов.

Введение

Детектирование объектов на изображениях является важной задачей, решение которой необходимо во многих практических применениях. Например, детектирование объектов необходимо выполнять при поиске изображений по картинке. При этом происходит сопоставление искомого изображения со всеми или некоторыми изображениями, хранящимися в базе, и в качестве ответа возвращаются те изображения, которые содержат искомый объект (тот объект, который есть на введённом пользователем изображении). Детектирование объектов может использоваться в промышленности (определение наличия или отсутствия дефектов на готовой продукции). В медицине детектирование объектов может использоваться для определения наличия или отсутствия тех или иных отклонений на снимках.

Встречаются и такие задачи, в которых помимо определения объекта на одном изображении необходимо удерживать этот объект в фокусе (то есть выполнять задачу трекинга, определять положение этого объекта в следующих кадрах последовательности). Примерами использования трекинга объектов являются: системы видеонаблюдения (представляющий интерес объект отслеживается от момента его попадания в кадр до момента его исчезновения из кадра), системы беспилотного управления автомобилем (такой системе необходимо отслеживать положение пешеходов, других автомобилей, дорожных знаков, элементов разметки).

В этой статье рассматриваются методы детектирования объектов на изображениях, которые используют глубокое обучение. Затем выполнено сравнение различных методов детектирования объектов между собой (классических методов друг с другом, классических с нейросетевыми в целом и различных нейросетевых), выделены достоинства и недостатки некоторых методов или групп методов.

Основная часть

Двухступенчатые детекторы объектов

Теперь рассмотрим подробнее использующие глубокое обучение методы детектирования объектов на изображениях. Начнём с двухступенчатых детекторов.

Одним из первых двухступенчатых детекторов объектов стала нейросеть R-CNN, которая была предложена в статье [3] в 2014 году. Название R-CNN означает “регионы с признаками свёрточной нейронной сети” (Regions with CNN features) [3]. Работа R-CNN начинается с выделения набора предложений объектов (кандидатов на ограничивающие

коробки [bounding box] объектов) с помощью отборочного поиска [1][4]. Затем каждое предложение объекта масштабируется в изображение фиксированного размера и подаётся в модель свёрточной нейросети, предобученную на базе изображений ImageNet [5] для извлечения признаков. Из каждого предложения региона извлекается вектор признаков размерностью 4096 [3] с использованием реализации [6] сети AlexNet. Признаки вычисляются с помощью прямого распространения RGB изображения размером 227 * 227, полученного после вычитания среднего (mean-subtracted), через 5 свёрточных и 2 полносвязных слоя [3]. Затем линейные классификаторы SVM (support vector machine, машина опорных векторов) используются для предсказания наличия объекта в пределах каждого региона и определения классов объектов [1]. По метрике mAP (mean Average Precision) нейросеть RCNN показала значительный отрыв от последней версии (v5) детектора DPM (deformable part model) [7], получив результат 54.2% против 33.7% у DPM v5 [3]. Недостатком сети R-CNN было избыточное вычисление признаков для большого количества пересекающихся предложенных регионов (более двух тысяч ограничивающих коробок на одном изображении [3]), что привело к низкой скорости детектирования (14 секунд на одно изображение с использованием GPU).

Нейросеть SPPNet (Spatial Pyramid Pooling Networks, пространственные пирамидальные пулинговые сети) была предложена в [8]. Предыдущие модели свёрточных нейросетей требуют на входе изображение фиксированного размера, например, 224 * 224 для AlexNet [1][2]. Требование фиксированного размера ограничивает как соотношение сторон, так и масштаб входного изображения. При применении к изображениям произвольных размеров методы свёрточных нейросетей "подгоняют" (fit) входное изображение под фиксированный размер с помощью обрезки (cropping) [2][9] или сжатия/растягивания по горизонтали или вертикали (warping) [10][3]. Но полученная в результате обрезки часть изображения может не содержать весь объект, а сжатие или растягивание может привести к нежелательным геометрическим искажениям (например, изменение пропорций), из-за чего точность детектирования может снизиться. Кроме того, заранее установленный масштаб (например, 224 * 224 пикселей) не всегда удобен, если размеры объектов сильно различаются [8]. В свёрточной нейросети именно полносвязные уровни требуют фиксированного размера входного сигнала по определению, а свёрточные уровни фиксированного размера сигнала на входе не требуют и могут генерировать карты признаков любого размера. Следовательно, ограничение фиксированного размера исходит только от полносвязных слоёв, которые расположены на более глубоких стадиях сети [8].

Главным вкладом сети SPPNet является введение уровня SPP (Spatial Pyramid Pooling, пространственный пирамидальный пулинг), который позволяет сети генерировать представление фиксированной длины вне зависимости от размера изображения или региона интереса (Region of Interest, RoI) без изменения его масштаба [1][8]. Уровень SPP добавлен поверх последнего свёрточного слоя. Уровень SPP "вытягивает" (pools) признаки и генерирует выходные сигналы фиксированной длины, которые затем подаются в полносвязные уровни (или другие классификаторы). Другими словами, таким образом выполняется "агрегация" информации на более глубокий уровень иерархии сети (между свёрточным и полносвязным слоями), чтобы избежать необходимости выполнять обрезку или растяжение/сжатие в начале [8]. При использовании SPPNet для детектирования объектов карты признаков можно вычислить из всего изображения только один раз, а затем можно генерировать представления фиксированной длины произвольных областей для обучения детекторов, что позволяет избежать повторного вычисления свёрточных признаков. SPPNet более чем в 20 раз быстрее R-CNN без ущерба для точности обнаружения (для набора данных VOC2007 значение метрики mAP равно 59.2%) [1]. Хотя SPPNet значительно улучшила скорость детектирования (по сравнению с R-CNN), у неё все еще есть некоторые недостатки. Первое, обучение осталось многоэтапным (multi-stage); второе, SPPNet настраивает (fine-tunes) только свои полносвязные слои, игнорируя все предыдущие слои [1].

Нейросеть Fast R-CNN, предложенная в [11] для задачи детектирования объектов, была дальнейшим улучшением сетей R-CNN и SPPNet. Сеть Fast R-CNN по сравнению с R-CNN и SPPNet имеет следующие преимущества (полученные благодаря использованию нового алгоритма обучения, исправляющего недостатки R-CNN и SPPNet) [11]. Первое, более высокое качество детектирования объектов по метрике mAP. Второе, обучение за один этап

(single-stage) с использованием многозадачной функции потерь (multi-task loss). Третье, обучение может обновлять все уровни сети. Четвёртое, для кэширования признаков не требуется дисковое хранилище [11]. Fast R-CNN позволяет одновременно обучать детектор и регрессор ограничивающих коробок (bounding box regressor) в одних и тех же конфигурациях сети. На датасете VOC07 сеть Fast R-CNN увеличила метрику mAP с 58.5% (результат R-CNN) до 70.0%, при этом скорость обнаружения увеличилась в 200 раз по сравнению с R-CNN [1]. Сеть Fast R-CNN принимает в качестве входных данных целое изображение и набор предложений объектов (object proposals). Сначала сеть обрабатывает всё изображение с помощью нескольких свёрточных и максимальных пулинговых слоёв для создания карты признаков. Затем для каждого предложения объекта пулинговый слой области интереса (RoI) извлекает вектор признаков фиксированной длины из карты признаков. Каждый вектор признаков подается в последовательность полносвязных слоёв, которые в конечном итоге разветвляются на два родственных (sibling) выходных слоя: один, который производит оценки вероятности (probability estimates) по К классам объектов с помощью функции активации softmax, плюс всеобъемлющий «фоновый» (background) класс, и другой слой, который выводит четыре действительных числа для каждого из К классов объектов. Каждый набор из 4 значений кодирует уточненные положения ограничивающей коробки для одного из К классов [11]. Хотя сеть Fast-RCNN успешно объединяет преимущества R-CNN и SPPNet, её скорость обнаружения по-прежнему ограничена детектированием предложений (то есть областей изображения, на которых предполагается наличие искомого объекта) [1].

В 2015 году была предложена [12] нейросеть Faster R-CNN, которая стала первым из использующих глубокое обучение детектором объектов, почти достигшем работы в режиме реального времени (near-realtime) [1]. Главным вкладом сети Faster-RCNN является введение сети предложений регионов (Region Proposal Network, RPN), которая позволяет делать предложения регионов с минимальными вычислительными затратами (nearly cost-free) [1]. RPN - это полностью свёрточная сеть, которая одновременно предсказывает границы объекта и оценки объектности (objectness scores) в каждой позиции. "Объектность" измеряет принадлежность к набору классов объектов против фона [12]. От R-CNN до Faster R-CNN большинство отдельных блоков системы детектирования объектов, например, обнаружение предложений, извлечение признаков, регрессия ограничивающих коробок и т. д., постепенно интегрировались в единую сквозную (end-to-end) структуру обучения [1]. Хотя Faster R-CNN преодолевает узкое место (bottleneck) скорости Fast R-CNN (метод Faster R-CNN позволяет основанной на глубоком обучении системе детектирования объектов работать со скоростью от 5 до 17 кадров в секунду [12]), на последующей стадии обнаружения все еще сохраняется избыточность вычислений [1]. Позднее было предложено множество улучшений, включая R-FCN [13] и Light-head R-CNN [14].

В 2017 году была предложена [15] нейросеть FPN (Feature Pyramid Networks, сети пирамиды признаков). До FPN большинство основанных на глубоком обучении детекторов выполняли детектирование только на картах признаков верхнего слоя сетей. Хотя признаки в более глубоких слоях CNN полезны для распознавания категорий, они не являются удобными для определения местоположения объектов. С этой целью в FPN разработана нисходящая (top-down) архитектура с боковыми (lateral) связями для построения высокоуровневой семантики во всех масштабах. Поскольку CNN естественным образом формирует пирамиду признаков посредством своего прямого распространения, FPN демонстрирует большие успехи в обнаружении объектов с большим количеством разных масштабов [1]. Эта архитектура, названная Feature Pyramid Network, демонстрирует значительное улучшение в качестве универсального извлекателя признаков в нескольких приложениях [15]. FPN улучшает детектирование объектов, решая проблемы изменения масштаба в изображениях. FPN является критически важным компонентом в современных фреймворках детектирования объектов, позволяя обнаруживать объекты в разных масштабах путем построения пирамид признаков с высокоуровневой семантикой. Практические приложения FPN включают детектирование объектов на изображениях, полученных с помощью дистанционного зондирования (remotely sensed images), плотное сопоставление пикселей для оценки несоответствия (disparity) и оптического потока, а также семантическую сегментацию изображений с высоким разрешением [16].

Одноступенчатые детекторы объектов

YOLO (You Only Look Once) был первым одноступенчатым детектором в "эрэ глубокого обучения" (deep learning era) [1]. Модель YOLO была предложена [17] в 2016 году. Модель YOLO является очень быстрой: её расширенная (enhanced) версия обрабатывает 45 кадров в секунду, быстрая версия обрабатывает 155 кадров в секунду, их значения метрики mAP равны 63.4% и 52.7% соответственно на базе VOC07 [1]. Предыдущие детекторы объектов перепрофилирует классификаторы для решения задачи детектирования. Вместо этого авторы модели YOLO формулируют детектирование объектов как задачу регрессии для пространственно разделенных ограничивающих коробок и связанных с ними вероятностей принадлежности объекта к одному из классов. Одна нейронная сеть предсказывает ограничивающие коробки и вероятности классов непосредственно из полных изображений за одно оценивание (evaluation). Поскольку весь конвейер обнаружения представляет собой одну сеть, его можно оптимизировать от начала до конца непосредственно на производительности обнаружения [17]. YOLO следует совершенно иной парадигме, чем двухступенчатые детекторы: применять одну нейронную сеть к полному изображению. Эта сеть делит изображение на области и одновременно предсказывает ограничивающие коробки и вероятности для каждого региона. В отличие от методов скользящего окна (sliding window) и основанных на предложении регионов техник (region proposal-based techniques), YOLO видит всё изображение во время обучения и тестирования, поэтому он неявно кодирует контекстную информацию о классах, а также об их внешнем виде (appearance) [17].

Модель YOLO делит входное изображение на сетку размером $S \times S$. Если центр объекта попадает внутрь ячейки этой сетки, значит эта ячейка отвечает за детектирование этого объекта. Каждая ячейка сетки предсказывает B ограничивающих коробок и оценки уверенности (confidence scores) для этих коробок. Эти оценки уверенности отражают, насколько модель уверена в том, что эта коробка содержит объект и насколько точной модель считает эту коробку. Если объекта в ячейке нет, оценка уверенности должна быть равна нулю. В противном случае желательно, чтобы оценка уверенности была равна метрике IoU (intersection over union, отношение площадей пересечения и объединения) между предсказанной коробкой и истинной коробкой (или эталонной коробкой, ground truth). Каждая ограничивающая коробка состоит из 5 предсказаний (predictions): x, y, w, h, c . Координаты (x, y) определяют центр коробки по отношению к границам ячейки сетки. Ширина w и высота h предсказаны по отношению ко всему изображению. Предсказание уверенности (c , confidence) представляет значение IoU между предсказанной и эталонной коробками. Каждая ячейка сетки также предсказывает C условных вероятностей классов (conditional class probabilities). Это вероятности [принадлежности объекта к классу] при условии того, что ячейка сетки содержит объект. Предсказывается только один набор вероятностей классов на одну ячейку сетки, вне зависимости от количества предсказанных коробок (B) в этой ячейке. Во время тестирования условные вероятности классов умножаются на предсказания уверенности для отдельных коробок, что даёт оценки уверенности для определённого класса (class-specific confidence scores) для каждой коробки. Эти оценки кодируют одновременно как вероятность наличия этого класса в коробке (probability of that class appearing in the box), так и то, насколько хорошо предсказанная коробка подходит к объекту. Предсказания кодируются как тензор размерами $S \times S \times (5B + C)$ [17]. Например, для оценивания работы YOLO на базе Pascal VOC (содержащей $C = 20$ размеченных классов), использовались значения $S = 7, B = 2$, в результате чего итоговое предсказание было тензором размерами $7 \times 7 \times 30$ [17].

Несмотря на значительное улучшение скорости детектирования, YOLO страдает от падения точности локализации по сравнению с двухступенчатыми детекторами, особенно для некоторых небольших объектов [1]. YOLO накладывает строгие пространственные ограничения на предсказания ограничивающих коробок, поскольку каждая ячейка сетки предсказывает только две рамки и может иметь только один класс. Это ограничивает количество близлежащих объектов, которые может предсказать модель YOLO. YOLO испытывает трудности с маленькими объектами, которые появляются группами (например, стаи птиц) [17]. Так как модель YOLO учится предсказывать ограничивающие коробки из данных, она испытывает трудности с обобщением на объекты в новых или необычных соотношениях сторон или конфигурациях. Модель YOLO также использует относительно

грубые признаки для предсказания ограничивающих коробок, поскольку архитектура имеет несколько слоев понижения разрешения (downsampling layers) входного изображения. Хотя YOLO обучается на функции потерь (loss function), которая аппроксимирует производительность детектирования, эта функция потерь обрабатывает ошибки одинаково в малых и больших ограничивающих коробках. Малая ошибка в большой коробке, как правило, безвредна, но малая ошибка в малой коробке имеет гораздо большее влияние на метрику IoU. Главным источником ошибок модели YOLO являются неправильные определения местоположений объектов [17].

Далее выходили более новые версии модели YOLO. Модель YOLOv2 (называемая YOLO9000) была предложена в [18]. На наборе данных Pascal VOC 2007 модель YOLOv2 показала результат mAP 78.6% по сравнению с результатом в 63.4% у изначальной модели YOLO [18] (хотя показатель FPS снизился с 45 до 40). В 2018 году была предложена модель YOLOv3 [19]. По сравнению с YOLOv2, у модели YOLOv3 значение метрики AP (Average Precision, средняя точность) увеличилось с 21.6 до 33.0 (то есть более чем на половину). После этого выходили версии YOLO от YOLOv4 до YOLOv11, но они уже разрабатывались другими исследователями, а не авторами исходной модели YOLO.

Модель детектирования объектов SSD (Single Shot MultiBox Detector) была предложена [20] в 2016 году. Основным вкладом SSD является внедрение методов обнаружения с несколькими ссылками (multi-reference) и несколькими разрешениями, что значительно повышает точность одноступенчатого детектора, особенно для некоторых маленьких объектов. SSD имеет преимущества как в скорости обнаружения, так и точности. Главное отличие SSD от предыдущих детекторов заключается в том, что SSD обнаруживает объекты разного масштаба на разных уровнях сети, тогда как предыдущие выполняют обнаружение только на своих верхних уровнях [1]. Метод SSD дискретизирует выходное пространство ограничивающих коробок в набор коробок по умолчанию (set of default boxes) с различными соотношениями сторон и масштабами для каждого местоположения карты признаков. Во время прогнозирования (prediction) сеть генерирует оценки для наличия каждой категории объектов в каждой рамке по умолчанию и вносит корректировки в рамку для лучшего соответствия форме объекта. Кроме того, сеть объединяет прогнозы из нескольких карт признаков с различными разрешениями для естественной обработки объектов разных размеров [20].

Сеть RetinaNet была предложена [21] для детектирования объектов в 2018 году. В сети RetinaNet была представлена новая функция потерь (loss function), называемая "focal loss". Эта функция была получена с помощью изменения стандартной функции потерь перекрёстной энтропии (standard cross entropy loss) так, чтобы детектор был в большей степени сосредоточен на неправильно классифицированных примерах во время обучения. Функция потерь focal loss позволяет одноступенчатым детекторам достигать сравнимой с двухступенчатыми детекторами точности, сохраняя при этом высокую скорость работы [1]. Чтобы оценить эффективность функции потерь focal loss, был спроектирован и обучен простой плотный детектор (simple dense detector), названный RetinaNet. Результаты показали, что при обучении с функцией потерь focal loss детектор RetinaNet может соответствовать скорости предыдущих одноступенчатых детекторов, превосходя при этом точность всех существовавших двухступенчатых детекторов [21].

Сеть CornerNet была предложена [22] в 2018 году. Предыдущие методы в основном использовали опорные коробки (anchor boxes) для предоставления ссылок классификации и регрессии. Такие характеристики объектов, как количество, местоположение, масштаб и соотношение сторон часто значительно отличаются для разных объектов на одном изображении или на разных изображениях. Из-за этих различий приходится настраивать большое количество опорных коробок для наилучшего соответствия истинным значениям [координат объектов] с целью достижения высокой точности предсказаний. В таком случае сеть будет страдать от дисбаланса категорий, множества вручную разработанных гиперпараметров и длительного времени сходимости. Чтобы решить эти проблемы, в сети CornerNet задача детектирования объекта рассматривается как задача прогнозирования местоположения ключевых точек (то есть углов ограничивающей коробки) [1]. CornerNet - это новый подход к детектированию объектов, при котором ограничивающая коробка

определяется как пара ключевых точек (pair of keypoints), то есть верхний левый и нижний правый углы, с использованием одной сверточной нейронной сети. Детектирование объектов как пар ключевых точек устраняет необходимость в проектировании набора опорных коробок (a set of anchor boxes), обычно используемых в предыдущих одноступенчатых детекторах. В дополнение к этой новой формулировке в сети CornerNet вводится объединение углов (corner pooling), новый тип пулингового слоя, который помогает сети лучше локализовать углы. Сеть CornerNet достигает метрики AP 42.1% на наборе данных MS COCO, превосходя все существовавшие одноступенчатые детекторы (например, у YOLOv2 этот результат равен 21.6%) [22].

В 2019 году была предложена [23] нейросеть CenterNet. CenterNet рассматривает объект как одну точку (центр объекта) и выполняет регрессию всех его атрибутов на основе опорной (reference) центральной точки. Модель может интегрировать обнаружение трехмерных объектов, оценку позы человека, обучение оптическому потоку, оценку глубины и другие задачи в единую структуру (single framework). CenterNet также может достигать сравнительных результатов детектирования (метрика AP_{50} на наборе данных MS COCO равна 61.1%) [1]. Для сравнения, у модели YOLOv3 эта метрика равна 57.9% [23]. Детектирование определяет объекты как выровненные по осям коробки (прямоугольные коробки, стороны которых параллельны осям, axis-aligned boxes) на изображении. Большинство детекторов объектов перечисляют почти исчерпывающий список потенциальных местоположений объектов и классифицируют каждое из этих местоположений. Это неэффективно (так как использует большое количество вычислений) и требует дополнительной постобработки. В сети CenterNet используется другой подход. Объект моделируется как одна точка - центральную точку его ограничивающей коробки. Этот детектор использует оценку ключевых точек для поиска центральных точек и выполняет регрессию ко всем другим свойствам объекта, таким как размер, трехмерное местоположение, ориентация и позиция. Такой подход на основе центральной точки, CenterNet, является дифференцируемым от начала до конца (is end-to-end differentiable), более простым, быстрым и точным, чем соответствующие детекторы на основе ограничивающей коробки (bounding box based detectors). CenterNet достигает наилучшего соотношения скорости и точности на наборе данных MS COCO со значениями метрики AP: 28.1% при 142 кадрах в секунду, 37.4% при 52 кадрах в секунду и 45.1% при многомасштабном тестировании (multi-scale testing) при 1.4 кадрах в секунду [23].

В 2020 году была представлена [24] модель DETR (DEtection TRansformer), в которой детектирование объектов рассматривается как набор задач предсказания и предлагается нейронная сеть детектирования с трансформерами (Transformers) [1]. Трансформер (Transformer) – это архитектура нейронной сети, которая была представлена в работе [25] для предсказания последовательностей (sequence prediction) [24]. Архитектура Transformer избегает повторения и вместо этого полностью полагается на механизм внимания для установления глобальных зависимостей между входом и выходом [25]. Механизмы самовосприятия (self-attention) трансформеров, которые явно моделируют все парные взаимодействия между элементами в последовательности, делают эти архитектуры особенно подходящими для определенных ограничений предсказания наборов, таких как удаление дублирующихся предсказаний [24]. Используемый в [24] подход оптимизирует конвейер детектирования (detection pipeline), эффективно устранив необходимость во многих разработанных вручную компонентах, таких как процедура подавления немаксимумов (non-maximum suppression, NMS) или генерация якорей (anchor generation), которые явно кодируют предыдущие знания о задаче. Основными компонентами новой структуры, называемой DEtection TRansformer или DETR, являются глобальная функция потерь на основе набора (set-based global loss), которая создаёт уникальные прогнозы с помощью двудольного сопоставления (via bipartite matching), и архитектура преобразователя-кодера-декодера. Учитывая фиксированный небольшой набор запросов изученных объектов, DETR рассуждает об отношениях объектов и глобальном контексте изображения, чтобы параллельно напрямую выводить окончательный набор прогнозов. Новая модель концептуально проста и не требует специализированной библиотеки, в отличие от многих других современных детекторов. DETR демонстрирует точность и производительность во время выполнения наравне с хорошо

зарекомендовавшей себя и сильно оптимизированной базовой моделью (baseline) Faster R-CNN на наборе данных MS COCO [24].

Развитием DETR стала предложенная в [26] модель Deformable DETR (деформируемый DETR). Модель DETR была предложена для устранения необходимости во многих разработанных вручную компонентах при решении задачи детектирования объектов, демонстрируя при этом хорошую производительность. Однако DETR страдает от медленной сходимости и ограниченного пространственного разрешения признаков из-за ограничений модулей внимания (attention modules) архитектуры Transformer при обработке карт признаков изображения. Для решения этих проблем предложена модель Deformable DETR, модули которой уделяют внимание только небольшому набору ключевых точек выборки вокруг опорной точки (around a reference). Деформируемый DETR может достичь лучшей производительности, чем DETR (особенно на небольших объектах) с меньшим в 10 раз количеством эпох обучения [26]. На наборе данных MS COCO 2017 модель Deformable DETR показала метрику AP 43.8 при 50 эпохах обучения (для сравнения, модель DETR показала метрику AP 42.0 при 500 эпохах обучения) [26].

Достоинства и недостатки различных методов автоматического определения объекта на изображении

Каждый из существующих методов (или группа из нескольких методов, имеющих значительную долю общих черт) детектирования объектов на изображениях имеет определённые достоинства и недостатки (по сравнению с другими методами или группами методов). Достоинством классических (то есть не использующих глубокое обучение) методов является отсутствие необходимости в длительном обучении нейронных сетей. Если сравнивать различные классические методы между собой, то преимуществом выделения особых точек перед корреляционным анализом является возможность их применять в случае некоторых геометрических преобразований (или искажений) искомого объекта на изображении (например, изменение масштаба, поворот). Достоинством корреляционного анализа (или, в более широком смысле, корреляционного сопоставления изображения с эталоном) является простота его программной реализации и возможность выбрать функцию соответствия некоторого действительного числа (которым в случае корреляционного анализа является коэффициент линейной корреляции между эталоном и перекрываемой им частью изображения) положению центра эталона на изображении. Корреляционное сопоставление изображения с эталоном можно применять и в случае поворота или изменения масштаба, но тогда необходимо помимо различных наборов координат $(x; y)$ вычислять значения коэффициента корреляции (или некоторой другой метрики сходства эталона и перекрываемой им части изображения) и при разных значениях масштаба и угла поворота, что кратно увеличивает время работы такого алгоритма.

Достоинством использующих глубокое обучение (нейросетевых) методов детектирования перед классическими является лучшая производительность. После 2010 года детектирование объектов на изображениях достигло своего плато, так как производительность вручную полученных признаков стала насыщенной (не могла дальше увеличиваться), дальнейшее развитие детектирования объектов произошло благодаря использованию свёрточных нейросетей начиная с 2012 года [1]. Важным достоинством свёрточных нейросетей по сравнению с классическими методами является отсутствие необходимости в ручном отборе признаков, так как в процессе обучения обновляются значения весов (масок свёрточных слоёв, матриц между полносвязными слоями, возможно значений параметров некоторых функций активации). Эффективность использования CNN для детектирования объектов объясняется и тем, что этот тип нейронных сетей был изначально разработан именно для работы с изображениями. Недостатками нейросетевых методов являются: необходимость длительного обучения (требующего значительных вычислительных ресурсов), часто возникающая проблема переобучения, необходимость в наличии достаточного количества размеченных изображений (то есть изображений, для каждого из которых есть список объектов, состоящий из координат двух противоположных углов ограничивающего прямоугольника и метки класса), дисбаланс классов (значительное различие в количествах объектов разных классов в наборе изображений, из-за чего детектирование более редко встречающихся объектов выполняется с более низкой точностью).

Среди нейросетевых методов детектирования объектов обычны сравнивают между собой группы двухступенчатых и одноступенчатых детекторов. Достоинством двухступенчатых детекторов является более высокая точность, их недостаток – длительность детектирования (из-за необходимости на первом этапе предложить регионы – прямоугольные области на изображении, в которых ожидается наличие искомых объектов, затем на втором этапе выполняется уточнение ограничивающих коробок и классификация найденных объектов). Из-за длительности работы двухступенчатые детекторы мало применимы в задачах, требующих работы в режиме реального времени (например, в беспилотных автомобилях). Такие детекторы подходят для задач, где точность важнее скорости (например, детектирование аномалий на медицинских изображениях). У одноступенчатых детекторов скорость работы является достоинством (например, быстрая версия модели YOLO обрабатывает 155 кадров в секунду [17]), а точность детектирования является недостатком (например, точность модели YOLO ниже, чем у двухступенчатых детекторов, особенно для маленьких объектов [1]). Иногда (например, в случае с Deformable DETR [26]) один и тот же детектор может иметь как одноступенчатую, так и двухступенчатую версии. Из-за скорости работы в требующих выполнения в режиме реального времени задачах чаще используются одноступенчатые детекторы.

Заключение

Детектирование объектов на изображениях является важной задачей, встречающейся в большом количестве практических применений. Исследования в области детектирования объектов продолжаются уже не менее 44 лет (детектор углов Моравеца был предложен в 1981 году). За десятилетия для решения этой задачи использовались различные типы методов. Приблизительно до 2010 года развивались классические методы, использующие некоторые найденные вручную характеристики изображений (как входного, так и искомого), которые затем или напрямую использовались для ответа на вопрос о наличии и (при наличии) координатах объекта или использовались в качестве признаков для методов машинного обучения (например, множественная линейная регрессия, возможно с различными типами регуляризации).

Затем подавляющее большинство исследований в области детектирования объектов сместилось в сторону использования свёрточных нейронных сетей, чему в значительной степени способствовало появление в 2012 году сети AlexNet. Использующие свёрточные нейронные сети методы детектирования объектов показали значительное увеличение производительности по сравнению с классическими методами, из-за чего и в настоящее время наибольшее количество исследований проводится именно с ними.

Нельзя дать абсолютно точный ответ на вопрос о том, какой метод детектирования является лучшим из всех существующих на данный момент. Одни методы показывают более высокую точность (двуступенчатые детекторы), но требуемый для их реализации объём вычислений ограничивает количество обрабатываемых в секунду изображений, что делает их малоприменимыми или вообще неприменимыми для задач, требующих работы в режиме реального времени. Другие методы работают быстрее (возможно даже в несколько раз), но их точность ниже (это в основном относится к одноступенчатым детекторам). Наиболее подходящий метод детектирования объектов зависит от конкретной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Z. Zou, K. Chen, Z. Shi, Y. Guo and J. Ye. Object Detection in 20 Years: A Survey. *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 3, pp. 257–276, March 2023, doi: 10.1109/JPROC.2023.3238524.
2. A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 2012, pp. 1097–1105.
3. R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 580–587.
4. Uijlings, J.R.R., van de Sande, K.E.A., Gevers, T. et al. Selective Search for Object Recognition. *Int J Comput Vis* 104, 154–171 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11263-013-0620-5>.
5. About ImageNet // image-net.org : [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: <https://image-net.org/about.php> (дата обращения: 18.04.2025).
6. Caffe // berkeleyvision.org : [Электронный ресурс]. – 2014. – URL: <https://caffe.berkeleyvision.org/> (дата обращения: 18.04.2025).
7. Discriminatively trained deformable part models // rossgirshick.info : [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: <https://www.rossgirshick.info/latent/> (дата обращения: 18.04.2025).

8. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2014). Spatial Pyramid Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition. Lecture Notes in Computer Science, 346–361. doi:10.1007/978-3-319-10578-9_23.
9. Zeiler, M.D., Fergus, R. Visualizing and understanding convolutional neural networks. arXiv:1311.2901v3 [cs.CV] 28 Nov 2013.
10. Donahue, J., Jia, Y., Vinyals, O., Hoffman, J., Zhang, N., Tzeng, E., Darrell, T. DeCAF: A deep convolutional activation feature for generic visual recognition. arXiv:1310.1531v1 [cs.CV] 6 Oct 2013.
11. Girshick, R. (2015). Fast R-CNN. 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). doi:10.1109/iccv.2015.169.
12. S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. Advances in neural information processing systems (NIPS), 2015, pp. 91–99. Available: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2015/file/14bfa6bb14875e45bba028a21ed38046-Paper.pdf
13. J. Dai, Y. Li, K. He, and J. Sun. R-FCN: Object detection via region-based fully convolutional networks. Advances in neural information processing systems (NIPS), 2016, pp. 379–387. Available: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2016/file/577ef1154f3240ad5b9b413aa7346a1e-Paper.pdf
14. Z. Li, C. Peng, G. Yu, X. Zhang, Y. Deng, and J. Sun. Light-head R-CNN: In defense of two-stage object detector. arXiv:1711.07264v2 [cs.CV] 23 Nov 2017.
15. T. -Y. Lin, P. Dollár, R. Girshick, K. He, B. Hariharan and S. Belongie. Feature Pyramid Networks for Object Detection. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, USA, 2017, pp. 936-944, doi: 10.1109/CVPR.2017.106. Available: <https://www.sci-hub.ru/10.1109/CVPR.2017.106>
16. FPN (Feature Pyramid Networks) // activeloop.ai : [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.activeloop.ai/resources/glossary/fpn-feature-pyramid-networks/> (дата обращения: 19.04.2025).
17. J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick and A. Farhadi. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 779-788, doi: 10.1109/CVPR.2016.91. Available: <https://www.sci-hub.ru/http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/CVPR.2016.91>
18. J. Redmon and A. Farhadi. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. arXiv preprint arXiv:1612.08242, 2016.
19. J. Redmon and A. Farhadi. YOLOv3: An Incremental Improvement. arXiv preprint arXiv:1804.02767, 2018.
20. W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C.-Y. Fu, and A. C. Berg. SSD: Single Shot MultiBox Detector. arXiv preprint arXiv:1512.02325, 2016.
21. T.-Y. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, and P. Dollar. Focal loss for dense object detection. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2018.
22. Law, H., & Deng, J. (2018). CornerNet: Detecting Objects as Paired Keypoints. Lecture Notes in Computer Science, 765–781. doi:10.1007/978-3-030-01264-9_45.
23. X. Zhou, D. Wang, and P. Krahenbuhl. Objects as points. arXiv preprint arXiv:1904.07850, 2019.
24. N. Carion, F. Massa, G. Synnaeve, N. Usunier, A. Kirillov, and S. Zagoruyko. End-to-end object detection with transformers. arXiv preprint arXiv:2005.12872, 2020.
25. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A.N., Polosukhin, I., et al. End-to-end object detection with transformers. arXiv preprint arXiv:1706.03762v5, 2017.
26. X. Zhu, W. Su, L. Lu, B. Li, X. Wang, and J. Dai. Deformable detr: Deformable transformers for end-to-end object detection. arXiv preprint arXiv:2010.04159v4, 2021.

Нечаев Александр Александрович

МФПУ «Синергия»,
аспирант
125315, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 80
Тел. +79859655769
E-mail: nechaev1228@mail.ru

Поляков Роман Николаевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,
доктор техн. наук, зав. кафедрой мехатроника,
механика и робототехника
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
Тел. +79038819381
E-mail: romanpolak@mail.ru

NECHAEV A.A., POLYAKOV R.N.

REVIEW OF IMAGE PROCESSING METHODS FOR OBJECT DETECTION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. PART 2

Annotation. The article provides an overview of the problem of detecting objects in an image. Several options for setting the problem, classifying the methods for solving it (into certain groups) are considered, and the main existing methods for solving it are described. The advantages and disadvantages of various methods are considered, various approaches are compared, and their advantages and disadvantages are highlighted. The article considers the development of methods for detecting objects over the past approximately forty years. The main ideas of the operation of both neural networks in general and convolutional neural networks in particular are described (since the highest performance in detecting objects was achieved by those methods that use convolutional neural networks). The problem of tracking objects is briefly considered, and some practical cases in which problems of detecting or tracking objects may arise are indicated. The article is published in two parts.

Keywords: digital image processing, object detection, object tracking.

BIBLIOGRAPHY

1. Z. Zou, K. Chen, Z. Shi, Y. Guo and J. Ye. Object Detection in 20 Years: A Survey. *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 3, pp. 257-276, March 2023, doi: 10.1109/JPROC.2023.3238524.
2. A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 2012, pp. 1097–1105.
3. R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 580–587.
4. Uijlings, J.R.R., van de Sande, K.E.A., Gevers, T. et al. Selective Search for Object Recognition. *Int J Comput Vis* 104, 154–171 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11263-013-0620-5>.
5. About ImageNet // image-net.org : [Electronic resource]. – 2020. – URL: <https://image-net.org/about.php> (дата обращения: 18.04.2025).
6. Caffe // berkeleyvision.org : [Electronic resource]. – 2014. – URL: <https://caffe.berkeleyvision.org/> (дата обращения: 18.04.2025).
7. Discriminatively trained deformable part models // rossgirshick.info : [Electronic resource]. – 2012. – URL: <https://www.rossgirshick.info/latent/> (дата обращения: 18.04.2025).
8. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2014). Spatial Pyramid Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition. *Lecture Notes in Computer Science*, 346–361. doi:10.1007/978-3-319-10578-9_23.
9. Zeiler, M.D., Fergus, R. Visualizing and understanding convolutional neural networks. *arXiv:1311.2901v3 [cs.CV]* 28 Nov 2013.
10. Donahue, J., Jia, Y., Vinyals, O., Hoffman, J., Zhang, N., Tzeng, E., Darrell, T. DeCAF: A deep convolutional activation feature for generic visual recognition. *arXiv:1310.1531v1 [cs.CV]* 6 Oct 2013.
11. Girshick, R. (2015). Fast R-CNN. *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. doi:10.1109/iccv.2015.169.
12. S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *Advances in neural information processing systems (NIPS)*, 2015, pp. 91–99. Available: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2015/file/14bfa6bb14875e45bba028a21ed38046-Paper.pdf
13. J. Dai, Y. Li, K. He, and J. Sun. R-FCN: Object detection via region-based fully convolutional networks. *Advances in neural information processing systems (NIPS)*, 2016, pp. 379–387. Available: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2016/file/577ef1154f3240ad5b9b413aa7346a1e-Paper.pdf
14. Z. Li, C. Peng, G. Yu, X. Zhang, Y. Deng, and J. Sun. Light-head R-CNN: In defense of two-stage object detector. *arXiv:1711.07264v2 [cs.CV]* 23 Nov 2017.
15. T. -Y. Lin, P. Dollár, R. Girshick, K. He, B. Hariharan and S. Belongie. Feature Pyramid Networks for Object Detection. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, HI, USA, 2017, pp. 936-944, doi: 10.1109/CVPR.2017.106. Available: <https://www.sci-hub.ru/10.1109/CVPR.2017.106>.
16. FPN (Feature Pyramid Networks) // activeloop.ai : [Electronic resource]. – 2022. – URL: <https://www.activeloop.ai/resources/glossary/fpn-feature-pyramid-networks/> (дата обращения: 19.04.2025).
17. J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick and A. Farhadi. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 779-788, doi: 10.1109/CVPR.2016.91. Available: <https://www.sci-hub.ru/10.1109/CVPR.2016.91>.
18. J. Redmon and A. Farhadi. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. *arXiv preprint arXiv:1612.08242*, 2016.
19. J. Redmon and A. Farhadi. YOLOv3: An Incremental Improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*, 2018.
20. W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C.-Y. Fu, and A. C. Berg. SSD: Single Shot MultiBox Detector. *arXiv preprint arXiv:1512.02325*, 2016.
21. T.-Y. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, and P. Dollar. Focal loss for dense object detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2018.
22. Law, H., & Deng, J. (2018). CornerNet: Detecting Objects as Paired Keypoints. *Lecture Notes in Computer Science*, 765–781. doi:10.1007/978-3-030-01264-9_45.
23. X. Zhou, D. Wang, and P. Krahenbuhl. Objects as points. *arXiv preprint arXiv:1904.07850*, 2019.
24. N. Carion, F. Massa, G. Synnaeve, N. Usunier, A. Kirillov, and S. Zagoruyko. End-to-end object detection with transformers. *arXiv preprint arXiv:2005.12872*, 2020.
25. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A.N., Polosukhin, I., et al. End-to-end object detection with transformers. *arXiv preprint arXiv:1706.03762v5*, 2017.
26. X. Zhu, W. Su, L. Lu, B. Li, X. Wang, and J. Dai. Deformable detr: Deformable transformers for end-to-end object detection. *arXiv preprint arXiv:2010.04159v4*, 2021.

Nechaev Alexandr Alexandrovich

MFIU Synergy
postgraduate student
125315, Moscow, Leningradsky Prospekt, 80
Ph.: +79859655769
E-mail: nechaev1228@mail.ru

Polyakov Roman Nikolaevich

Orel State University named after I.S. Turgenev
doctor of technical Sciences, Head of the department
mechatronics, mechanics and robotics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.:+79038819381

ЗЛОБИН С.Н., КОРЧАГИН В.О.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСА С РЕЛЬСОМ

Аннотация. Рассмотрены вопросы моделирования усилителя сцепления колеса с рельсом, основанного на использовании магнитного поля. Получены аналитические зависимости, построены графики.

Ключевые слова: математическое моделирование, усилитель сцепления колеса с рельсом, метод конечных элементов, магнитное поле, магнитопровод.

Введение

Для обеспечения эффективного функционирования устройств их разработка обычно сопровождается физическим и математическим моделированием [1]. Физическое моделирование связано с материальными затратами, поскольку требует изготовление макетов и их последующее исследование. Часто физическое моделирование невозможно из-за сложности устройств. Для решения этой задачи, прибегают к математическому моделированию [2]. Моделью удобно пользоваться на этапе проектирования и проведения поисково-исследовательских работ. Модель позволяет не проводя дополнительных экспериментов, выявить характер работы устройства, внести улучшения в его конструкцию, тем самым добиться оптимизации затрат, не прибегая к дорогостоящему изготовлению натурных моделей.

Основная часть

Использование устройств, усиливающих сцепление колеса с рельсом [3], позволяет решить проблемы, связанные с возникновением таких процессов, как буксование и юз колёсных пар. В данной работе рассмотрено устройство, основанное на воздействии магнитного поля катушки. При этом колесо и рельс являются частью магнитной цепи, между ними возникают силы притяжения. Подобное устройство может использоваться на трудных участках, оно позволяет при необходимости повысить сцепной вес локомотива на требуемую величину. Положительная особенность заключается в том, что вливание затрат на усиление верхнего строения пути потребуется лишь на наиболее трудных участках.

Первичная конструкция устройства включает индуктор, расположенный вдоль шейки рельса по обе её стороны, а также элементы разомкнутой магнитной цепи – обод колеса, головка рельса и воздушный зазор. Расчётная магнитная цепь и сетка конечных элементов приведены на рисунке.

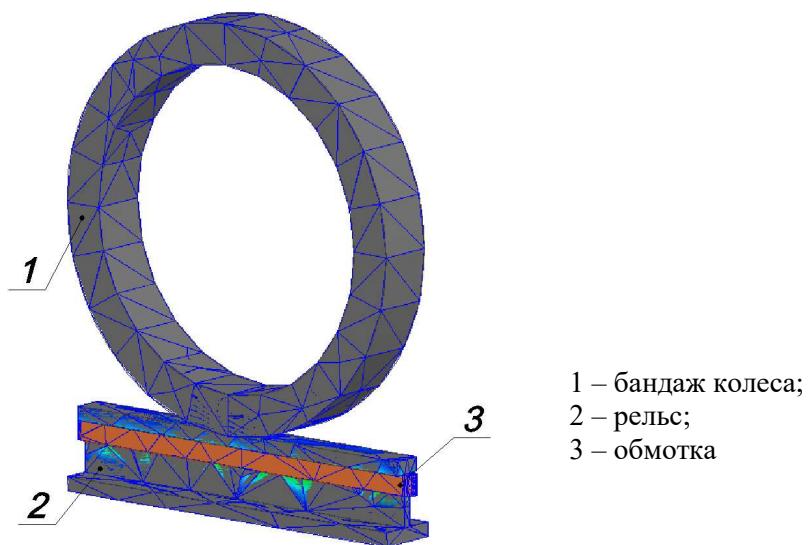


Рисунок 1 – Расчётная магнитная цепь и сетка конечных элементов

Метод конечных элементов получил широкое распространение при анализе полей и процессов в электромеханических системах [4]. При расчёте магнитных систем [5] методом конечных элементов пространство разбивается поверхностями на отдельные части, которые имеют форму треугольников, прямоугольников, а при трёхмерной задаче – параллелепипедов, тетраэдров. Конечные элементы не перекрывают друг друга, в узловых точках (вершинах конечных элементов первого порядка) конечных элементов рассчитываются значения искомых параметров. Для расчётной модели системы колесо-рельс построена сетка конечных элементов.

Каждый конечный элемент имеет три вершины-узла, скалярный магнитный потенциал для каждого конечного элемента представляется в виде полинома с коэффициентами, постоянными для данного элемента. Для каждого элемента потенциал задаётся линейным полиномом первого порядка.

$$\varphi_{(i)} = a_{(i)} + b_{(i)} \cdot x + c_{(i)} \cdot y, \quad (1)$$

где $a_{(i)}, b_{(i)}, c_{(i)}$ – коэффициенты i -го элемента.

Задача метода конечных элементов сводится к определению коэффициентов для каждого элемента посредством решения уравнений Лапласа или Пуассона. В результате появляется возможность определить скалярный магнитный потенциал в любой точке поля. Для получения решения высокой точности требуется достаточно густая сетка и значительные вычислительные ресурсы. При анализе симметричных областей применяется метод конечных суперэлементов. При этом расчетная область разбивается на ряд суперэлементов, решение задачи на первом этапе сосредотачивается внутри суперэлемента. Каждый суперэлемент оснащается системой базисных функций, которые являются решениями рассматриваемого уравнения в СЭ, с некоторыми граничными условиями. Использование сетки суперэлементов и базисных функций дает возможность находить решение при существенной экономии вычислительных ресурсов и времени подготовки модели.

Расчет двумерного стационарного магнитного поля с учетом нелинейных магнитных свойств среды сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных (2).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\Delta, \quad (2)$$

где A_z – составляющая векторного магнитного потенциала по оси z ,

$\nu = 1/\mu$ – величина, обратная магнитной проницаемости среды.

Замена краевой задачи вариационной сводится к минимизации нелинейного энергетического функционала (3). Расчетные уравнения метода конечных элементов получаются в результате минимизации функционала в области Ω , которая предварительно разделена на произвольное число элементов.

$$F = \int_{\Omega} \left(\int_0^1 \nu \cdot B_x \cdot dB_x + \int_0^1 \nu \cdot B_y \cdot dB_y \right) \cdot d\Omega - \int_S A_z \cdot \Delta \cdot d\Omega, \quad (3)$$

где Ω – область расчета магнитного поля.

Векторный магнитный потенциал A_z внутри произвольного треугольного элемента m с вершинами i, j, k , имеющими координаты $(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_k, y_k)$, определяется значениями A_z в вершинах (4).

$$A_z = \left[(a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y) \cdot A_{zi} + (a_j + b_j \cdot x + c_j \cdot y) \cdot A_{zj} + (a_k + b_k \cdot x + c_k \cdot y) \cdot A_{zk} \right] / (2 \cdot S_{\Delta}), \quad (4)$$

где A_{zi}, A_{zj}, A_{zk} – векторный магнитный потенциал в вершинах треугольника.

$$a_i = x_j \cdot y_k - x_k \cdot y_j, \quad b_i = y_j - y_k, \quad c_i = x_k - x_j, \quad a_j = x_k \cdot y_i - x_i \cdot y_k, \quad b_j = y_k - y_i,$$

$c_j = x_i - x_k$, $a_k = x_i \cdot y_j - x_j \cdot y_i$, $b_k = y_i - y_j$, $c_k = x_j - x_i$ – коэффициенты базисной функции;

$$S_{\Delta} = \frac{(x_i \cdot b_i + x_j \cdot b_j + x_k \cdot b_k)}{2} \text{ – площадь треугольника } m.$$

Внутри треугольника B_x и B_y (5) принимаются постоянными величинами.

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = (c_i \cdot A_{zi} + c_j \cdot A_{zj} + c_k \cdot A_{zk}) / (2 \cdot S_{\Delta}),$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -(b_i \cdot A_{zi} + b_j \cdot A_{zj} + b_k \cdot A_{zk}) / (2 \cdot S_{\Delta}), \quad (5)$$

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}.$$

Минимум функционала находят из системы уравнений (6).

$$\frac{\partial F^m}{\partial A_{zp}} = 0 \quad (6)$$

Произведён расчёт распределения магнитного поля и величины индукции (рисунок 2) в магнитной системе колесо-рельс без использования вспомогательного магнитопровода. Магнитный поток определен, как интеграл нормали вектора магнитной индукции, через пятно контакта. Максимальная концентрация поля приходится на шейку рельса.

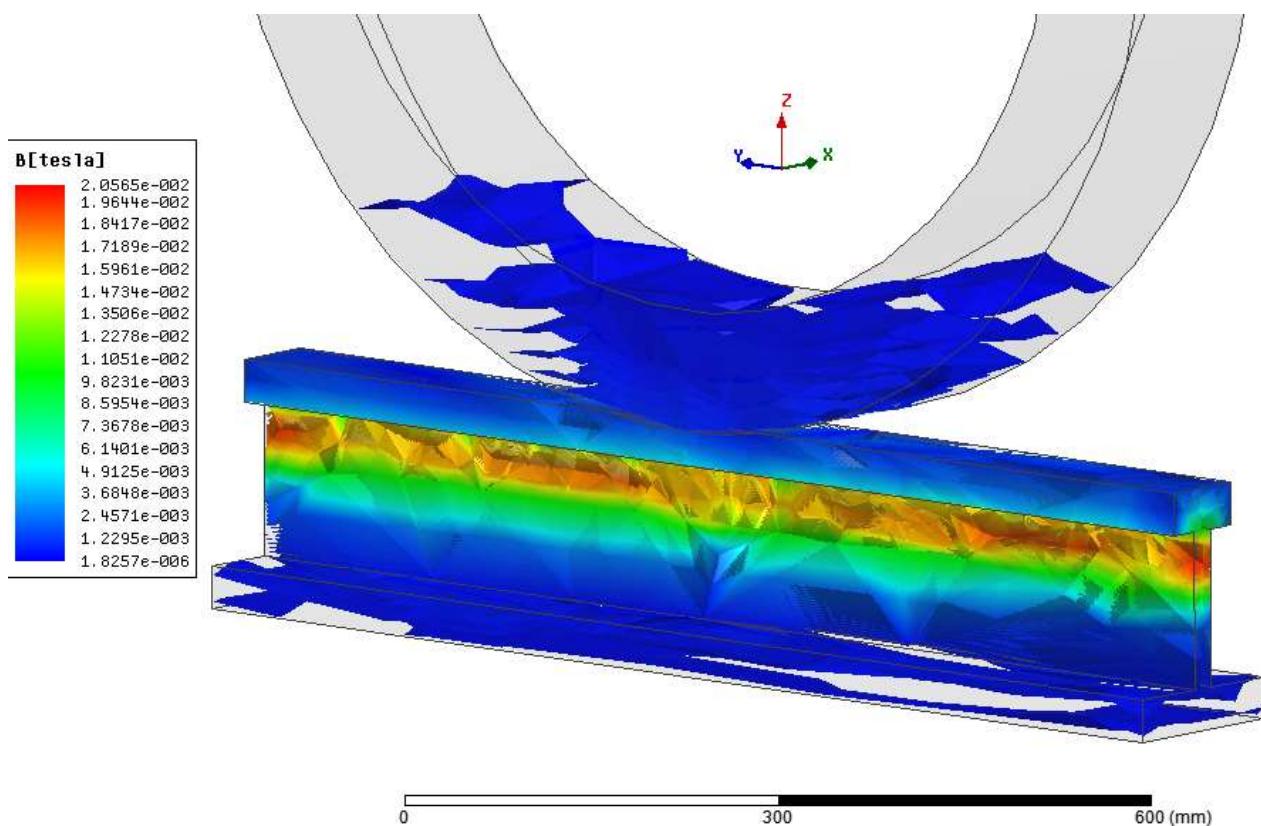


Рисунок 2 – Концентрация магнитного поля без вспомогательного магнитопровода

Вышеприведенная конструкция магнитной системы обладает довольно большими потерями за счёт значительного воздушного зазора [6]. Для повышения качества системы и перераспределения энергии поля в зону контакта колеса с рельсом рассмотрен альтернативный вариант конструкции – магнитная цепь дополняется вспомогательным магнитопроводом (рисунок 3), который располагается на рельсе. Магнитопровод принят с учётом конструкционных особенностей колёсной пары и её эксплуатационного взаимодействия с рельсовой колеёй. Расчёт показывает, что обеспечивается хорошая

однородность магнитного поля в зоне контакта колеса с рельсом. При МДС 1000 А-витков магнитный поток, пронизывающий зону контакта колеса и рельса составляет 0,00016 Вб, индукция – 0,74 Тл, напряжённость – 298 А/м, сила притяжения – 95 Н. Представлен график (рисунок 4) зависимости сил, действующих на колесо и рельс, от величины магнитодвижущей силы.

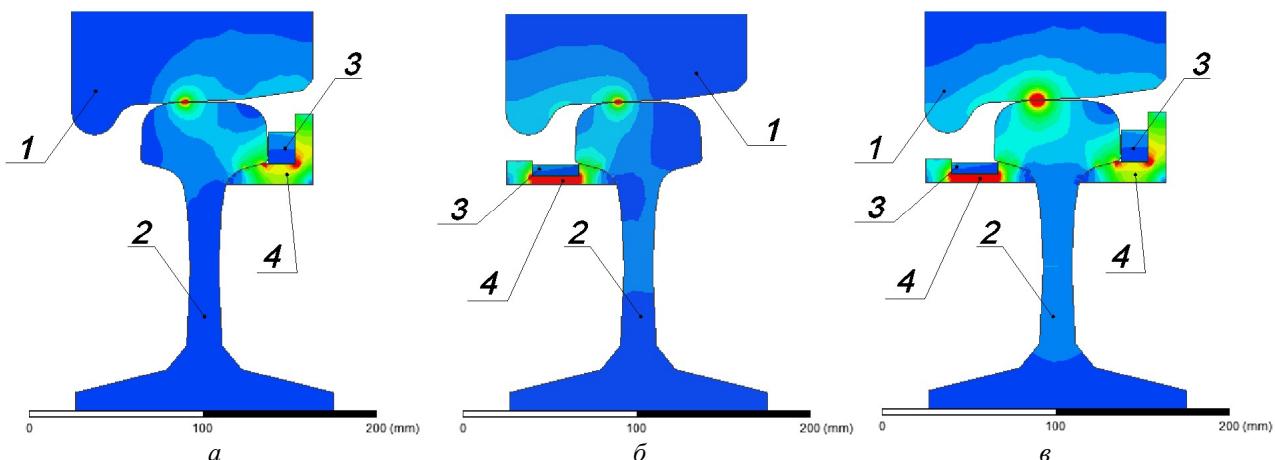


Рисунок 3 – Концентрация магнитного поля со вспомогательным магнитопроводом:
 а – насыщение магнитной цепи от правой части обмотки; б – насыщение магнитной цепи от левой части обмотки; в – насыщение магнитной цепи от всей обмотки;
 1 – бандаж колеса; 2 – рельс; 3 – обмотка; 4 –вспомогательный магнитопровод

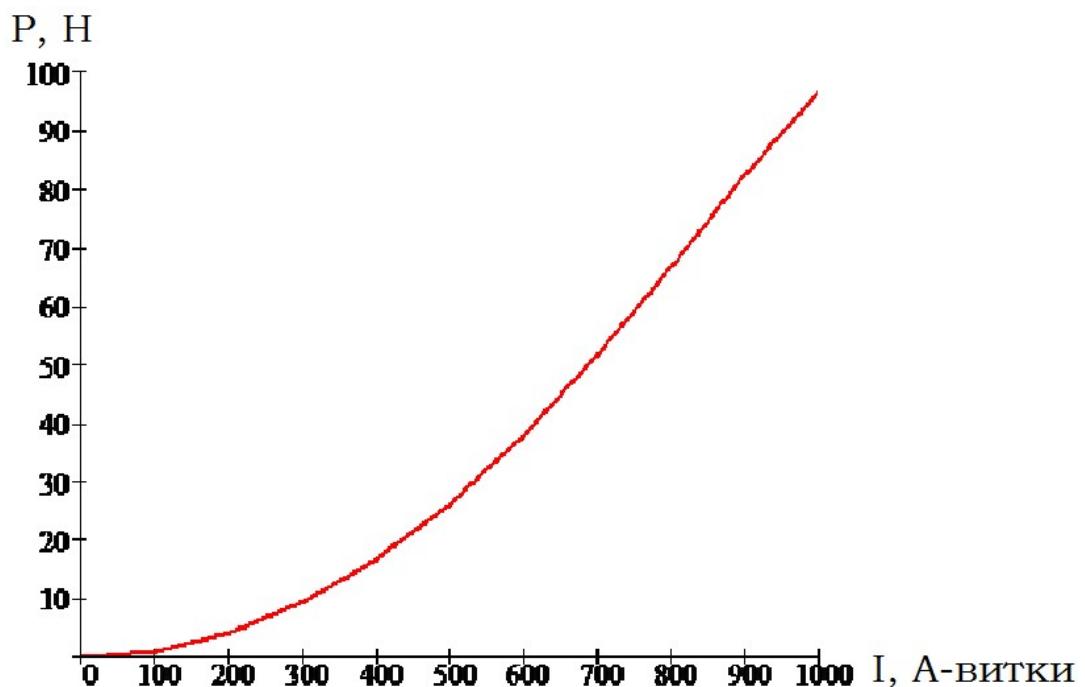


Рисунок 4 – Зависимость сил, действующих на колесо и рельс от величины магнитодвижущей силы

При расчёте классическим методом расчётный магнитопровод включает: бандаж колеса, головку рельса, и вспомогательную часть. Магнитная цепь (рисунок 5) состоит из трёх ветвей, средняя содержит источник МДС. Основная кривая намагничивания приведена в таблице 1 и на рисунке 6.

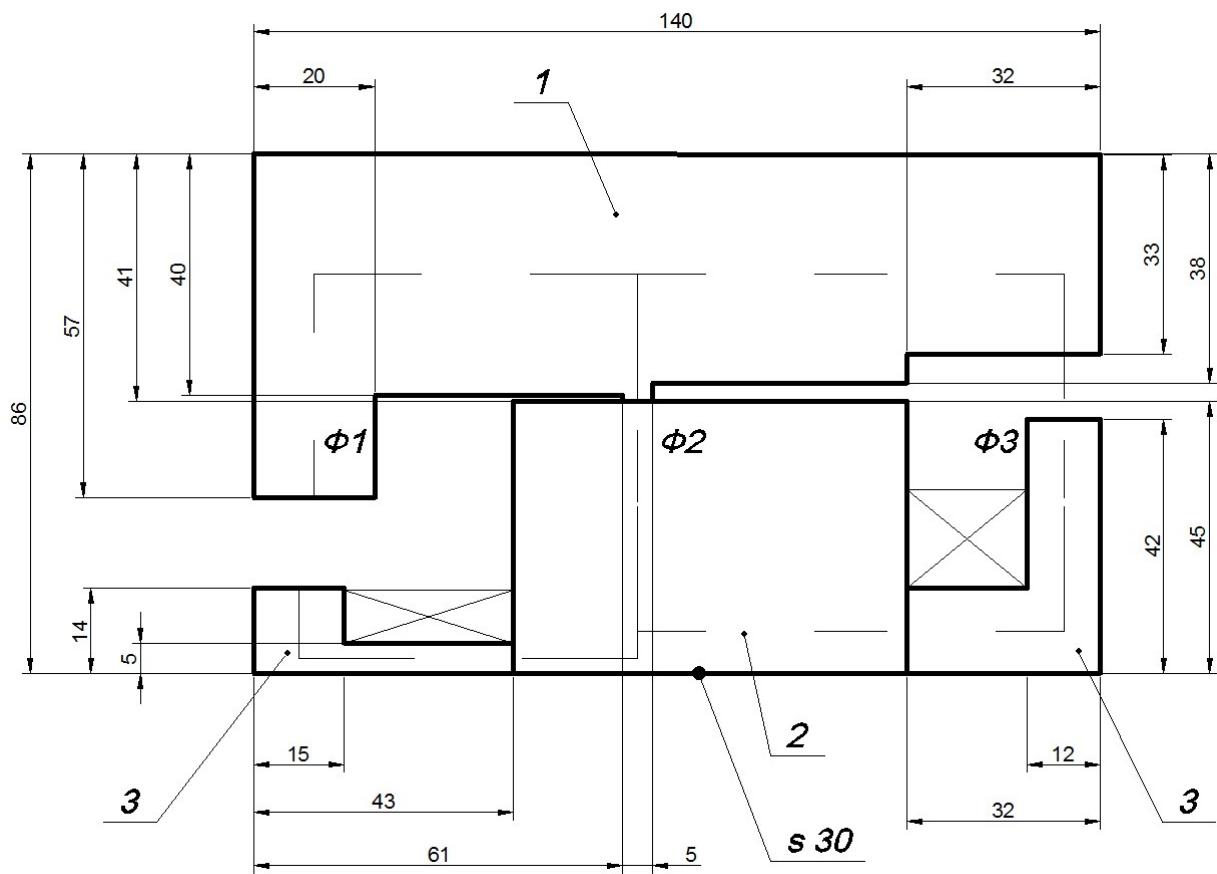


Рисунок 5 – Расчётная магнитная цепь:
1 – бандаж колеса; 2 – головка рельса; 3 – вспомогательная часть магнитопровода

Таблица 1 – Основная кривая намагничивания

B, Тл	H, А/м
0	0
0,24	159
0,87	318
1,25	637
1,33	796
1,50	1592
1,60	3183
1,68	4775
1,74	6366
1,78	7958
1,91	15916
2,02	31831
2,09	47747
2,13	63662
2,17	79578
2,28	159155
2,48	318310
2,59	397887

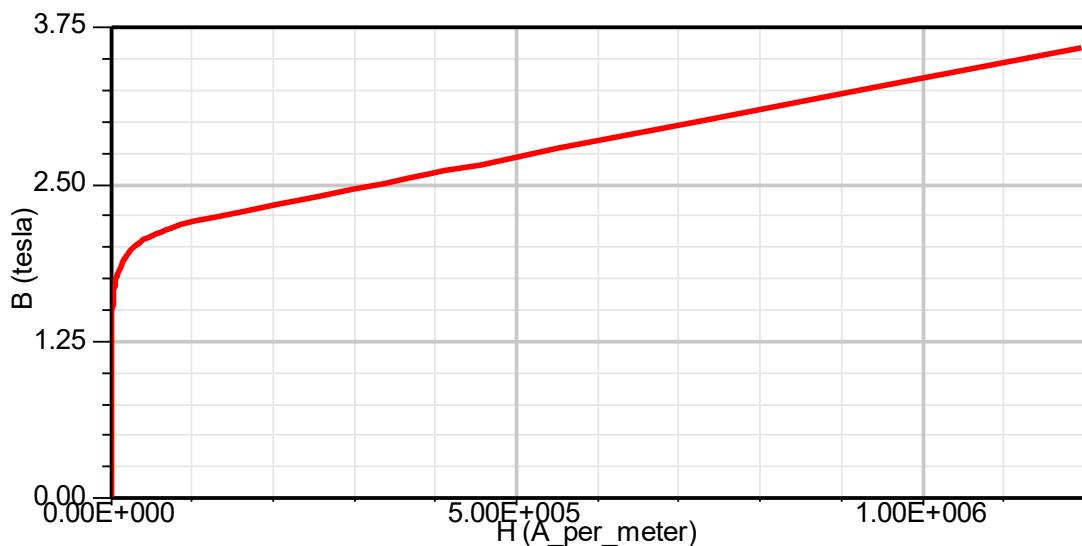


Рисунок 6 – Основная кривая намагничивания магнитопровода

Ниже приведён расчёт магнитной цепи при следующих значениях МДС, равной $I_w := 1000$ А-витков. Толщина магнитопровода принята $t := 0.03$ м.

Средние магнитные линии:

$$\begin{aligned} I_{11} &:= 0.012 & I_{21} &:= 0.018 & I_{31} &:= 0.040 & I_{12} &:= 0.015 & I_{22} &:= 0.002 & I_{32} &:= 0.011 \\ I_{13} &:= 0.037 & I_{23} &:= 0.001 & I_{33} &:= 0.013 & I_{14} &:= 0.055 & I_{18} &:= 0.055 & I_{24} &:= 0.043 \\ I_{34} &:= 0.071 & I_{38} &:= 0.071 \end{aligned}$$

Площади поперечных сечений:

$$\begin{aligned} S_{11} &:= 0.015 \cdot t & S_{11} &= 4.5 \times 10^{-4} & S_{21} &:= 0.065 \cdot t & S_{21} &= 1.95 \times 10^{-3} \\ S_{12} &:= 0.02 \cdot t & S_{12} &= 6 \times 10^{-4} & S_{22} &:= 0.023 \cdot t & S_{22} &= 6.9 \times 10^{-4} \\ S_{13} &:= 0.02 \cdot t & S_{13} &= 6 \times 10^{-4} & S_{23} &:= 0.005 \cdot t & S_{23} &= 1.5 \times 10^{-4} \\ S_{14} &:= 0.04 \cdot t & S_{14} &= 1.2 \times 10^{-3} & S_{24} &:= 0.065 \cdot t & S_{24} &= 1.95 \times 10^{-3} \\ S_{18} &:= 0.005 \cdot t & S_{18} &= 1.5 \times 10^{-4} & S_{31} &:= 0.012 \cdot t & S_{31} &= 3.6 \times 10^{-4} \\ S_{32} &:= 0.012 \cdot t & S_{32} &= 3.6 \times 10^{-4} & S_{33} &:= 0.012 \cdot t & S_{33} &= 3.6 \times 10^{-4} \\ S_{34} &:= 0.033 \cdot t & S_{34} &= 9.9 \times 10^{-4} & S_{38} &:= 0.014 \cdot t & S_{38} &= 4.2 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Максимально возможный магнитный поток в ветвях:

$$\Phi_{1max} := \frac{I_w \cdot (\mu_0 \cdot S_{12})}{I_{12}} \quad \Phi_{1max} = 5.027 \times 10^{-5}$$

$$\Phi_{3max} := \frac{I_w \cdot (\mu_0 \cdot S_{32})}{I_{32}} \quad \Phi_{3max} = 4.113 \times 10^{-5}$$

$$\Phi_{2max} := \Phi_{1max} + \Phi_{3max} \quad \Phi_{2max} = 9.139 \times 10^{-5}$$

Максимальная индукция и напряжённость поля при потоке меньше Φ_{max} в $1/k$ раз.

$$B_{11}(k) := \frac{\Phi_{1max} \cdot k}{S_{11}} \quad H_{11}(k) := A(B_{11}(k)) \quad B_{31}(k) := \frac{\Phi_{3max} \cdot k}{S_{31}} \quad H_{31}(k) := A(B_{31}(k))$$

$$B_{12}(k) := \frac{\Phi_{1max} \cdot k}{S_{12}} \quad H_{12}(k) := 0.8 \cdot 10^6 \cdot B_{12}(k)$$

$$B_{32}(k) := \frac{\Phi_{3max} \cdot k}{S_{32}} \quad H_{32}(k) := 0.8 \cdot 10^6 \cdot B_{32}(k) \quad B_{13}(k) := \frac{\Phi_{1max} \cdot k}{S_{13}} \quad H_{13}(k) := A(B_{13}(k))$$

$$\begin{aligned}
 B33(k) &:= \frac{\Phi 3 \max \cdot k}{S33} & H33(k) &:= A(B33(k)) & B14(k) &:= \frac{\Phi 1 \max \cdot k}{S14} & H14(k) &:= A(B14(k)) \\
 B34(k) &:= \frac{\Phi 3 \max \cdot k}{S34} & H34(k) &:= A(B34(k)) & B15(k) &:= \frac{\Phi 1 \max \cdot k}{S15} & H15(k) &:= A(B15(k)) \\
 B35(k) &:= \frac{\Phi 3 \max \cdot k}{S35} & H35(k) &:= A(B35(k)) & B16(k) &:= \frac{\Phi 1 \max \cdot k}{S16} & H16(k) &:= A(B16(k)) \\
 B36(k) &:= \frac{\Phi 3 \max \cdot k}{S36} & H36(k) &:= A(B36(k)) & B17(k) &:= \frac{\Phi 1 \max \cdot k}{S17} & H17(k) &:= A(B17(k)) \\
 B37(k) &:= \frac{\Phi 3 \max \cdot k}{S37} & H37(k) &:= A(B37(k)) & B18(k) &:= \frac{\Phi 1 \max \cdot k}{S18} & H18(k) &:= A(B18(k)) \\
 B38(k) &:= \frac{\Phi 3 \max \cdot k}{S38} & H38(k) &:= A(B38(k)) & B21(k) &:= \frac{\Phi 2 \max \cdot k}{S21} & H21(k) &:= A(B21(k)) \\
 B22(k) &:= \frac{\Phi 2 \max \cdot k}{S22} & H22(k) &:= A(B22(k)) & B23(k) &:= \frac{\Phi 2 \max \cdot k}{S23} & H23(k) &:= A(B23(k)) \\
 B24(k) &:= \frac{\Phi 2 \max \cdot k}{S24} & H24(k) &:= A(B24(k))
 \end{aligned}$$

Магнитное напряжение:

$$Iw1(k) := H11(k) \cdot I11 + H12(k) \cdot I12 + H13(k) \cdot I13 + H14(k) \cdot I14 + H18(k) \cdot I18$$

$$Iw2(k) := Iw - (H22(k) \cdot I22 + H23(k) \cdot I23 + H24(k) \cdot I24)$$

$$Iw3(k) := H31(k) \cdot I31 + H32(k) \cdot I32 + H33(k) \cdot I33 + H34(k) \cdot I34 + H38(k) \cdot I38$$

Магнитные напряжения и их зависимость от коэффициента k приведены ниже.

$$\begin{aligned}
 k = & \begin{pmatrix} 1 \\ 0.9 \\ 0.8 \\ 0.7 \\ 0.6 \\ 0.5 \\ 0.4 \\ 0.3 \\ 0.2 \\ 0.1 \\ 0 \end{pmatrix} & Iw1(k) = & \begin{pmatrix} 1.02 \times 10^3 \\ 918.4 \\ 816.957 \\ 715.391 \\ 613.193 \\ 510.994 \\ 408.795 \\ 306.596 \\ 204.398 \\ 102.199 \\ 2.269 \times 10^{-13} \end{pmatrix} & Iw2(k) = & \begin{pmatrix} 998.237 \\ 998.404 \\ 998.57 \\ 998.736 \\ 998.903 \\ 999.069 \\ 999.236 \\ 999.426 \\ 999.617 \\ 999.809 \\ 1 \times 10^3 \end{pmatrix} & Iw3(k) = & \begin{pmatrix} 1.016 \times 10^3 \\ 914.293 \\ 812.705 \\ 711.117 \\ 609.528 \\ 507.94 \\ 406.352 \\ 304.764 \\ 203.176 \\ 101.588 \\ 2.256 \times 10^{-13} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

На основании приведенных данных построена зависимость магнитного напряжения на узлах цепи от коэффициента k (рисунок 7).

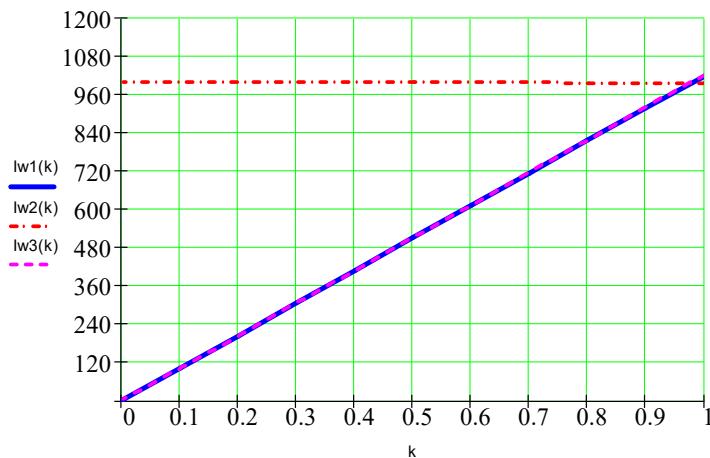


Рисунок 7 – Зависимость магнитного напряжения на узлах цепи от коэффициента k

$$k := 0.98 \quad l_w = 1 \times 10^3$$

Левый воздушный зазор (первая ветвь):

$$B_{12}(k) = 0.082 \text{ Тл}; \quad H_{12}(k) = 6.568 \times 10^4 \text{ А/м};$$

$$B_{12}(k) \cdot S_{12} = 4.926 \times 10^{-5} \text{ Вб}; \quad \phi_{1\max} \cdot k = 4.926 \times 10^{-5} \text{ Вб};$$

Пятно контакта (вторая ветвь):

$$B_{23}(k) = 0.597 \text{ Тл}; \quad H_{23}(k) = 249.123 \text{ А/м};$$

$$B_{23}(k) \cdot S_{23} = 8.956 \times 10^{-5} \text{ Вб}; \quad \phi_{2\max} \cdot k = 8.956 \times 10^{-5} \text{ Вб};$$

Правый воздушный зазор (третья ветвь):

$$B_{32}(k) = 0.112 \text{ Тл} \quad H_{32}(k) = 8.956 \times 10^4 \text{ А/м}$$

$$B_{32}(k) \cdot S_{32} = 4.03 \times 10^{-5} \text{ Вб}; \quad \phi_{3\max} \cdot k = 4.03 \times 10^{-5} \text{ Вб}.$$

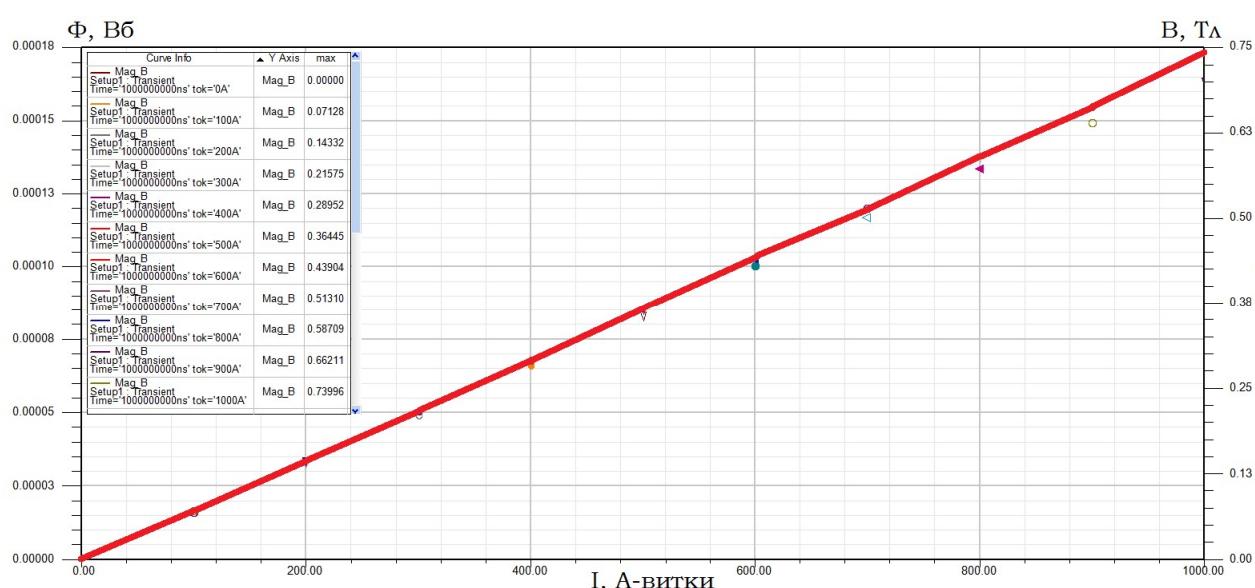


Рисунок 8 – Зависимость магнитного потока и индукции в зоне контакта от МДС

Выводы

Магнитная система устройств характеризуется сложной трехмерной геометрией, многообразием границ раздела сред с различными магнитными свойствами, нелинейностью характеристик намагничивания. Для получения возможности аналитического решения принимается ряд упрощающих допущений, как следствие, аналитические методы не могут обеспечить решение системы уравнений с требуемой точностью. Применение упрощенных математических моделей ограничивается предварительными проектными расчетами.

Возможность повышения степени достоверности математических моделей связана с глубоким анализом магнитного поля в ферромагнитных средах на основе применения численных методов решения нелинейных краевых задач. Такие исследования позволяют по-новому построить математические модели и учесть особенности процессов, возникающие с высокими нагрузками и нетипичными конфигурациями и соотношениями геометрических размеров.

Уровень развития методов решения краевых задач математической физики и возможности вычислительной техники позволяют существенно уточнить и дополнить математические модели. Таким образом, трёхмерная параметрическая модель исследуемого усилителя сцепления, основанная на геометрии тел, характеристиках материалов и условиях работы, позволяет получить данные динамического и статического состояния, максимально приближённые к реальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Злобин, С.Н. Применение объектной модели для конструирования устройств для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / С.Н. Злобин, М.А. Маслов, С.О. Копылов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2023. – № 4 (360). – С. 34-41.
2. Самарский, А.А. Введение в численные методы: учебное пособие для вузов / А.А. Самарский. – Изд. 3-е, стер. – Санкт-Петербург: Издательство "Лань", 2005. – 288 с: ил.
3. Злобин, С.Н. Технические решения колесно-моторных блоков с магнитными усилителями сцепления / С.Н. Злобин, М.А. Маслов, Д.А. Бондаренко, С.Г. Волохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2024. – № 5 (367). – С. 29-37.
4. Геча В.Я. Использование конечноэлементных моделей для проектирования фрагментов сложных электромеханических систем / В.Я. Геча // Труды ВНИИЭМ. – Москва, 1985.
5. Буль, О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEM: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / О.Б. Буль. – Москва: Издательский центр "Академия", 2005. – 336 с.
6. Сливинская, А.Г. Электромагниты и постоянные магниты: учебное пособие для студентов вузов / А.Г. Сливинская. – Москва: Энергия, 1972.

Злобин Сергей Николаевич

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл
Кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения
E-mail: zsn2@rambler.ru

Корчагин Вадим Олегович

Российский университет транспорта (МИИТ),
г. Москва
Доцент кафедры «Тяговый подвижной состав»
E-mail: otvet111333@gmail.com

ZLOBIN S.N., KORCHAGIN V.O.

MODELING OF A RAIL-WHEEL CLUTCH BOOSTER

Abstract. The issues of modeling the wheel-rail coupling amplifier based on the use of a magnetic field are considered. Analytical dependencies are obtained, graphs are constructed.

Keywords: mathematical modeling, wheel-rail adhesion amplifier, finite element method, magnetic field, magnetic circuit.

BIBLIOGRAPHY

1. Zlobin, S.N. Primenenie ob"ektnoj modeli dlya konstruirovaniya ustrojstv dlya uvelicheniya scepleniya vedushchih koles lokomotiva s rel'sami / S.N. Zlobin, M.A. Maslov, S.O. Kopylov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva», 2023. – № 4 (360). – S. 34-41.
2. Samarskij, A.A. Vvedenie v chislennye metody: uchebnoe posobie dlya vuzov / A.A. Samarskij. – Izd. 3-е, ster. – Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo "Lan", 2005. – 288 s: il.
3. Zlobin, S.N. Tekhnicheskie resheniya kolesno-motornyh blokov s magnitnymi usilitelyami scepleniya / S.N. Zlobin, M.A. Maslov, D.A. Bondarenko, S.G. Volohov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva», 2024. – № 5 (367). – S. 29-37.
4. Gecha V.YA. Ispol'zovanie konechnoelementnyh modelej dlya proektirovaniya fragmentov slozhnyh elektromekhanicheskikh sistem / V.YA. Gecha // Trudy VNIIM. – Moskva, 1985.
5. Bul', O.B. Metody raschёta magnitnyh sistem elektricheskikh apparatov: magnitnye celi, polya i programma FEM: uchebnoe posobie dlya studentov vysshih uchebnyh zavedenij / O.B. Bul'. – Moskva: Izdatel'skij centr "Akademiya", 2005. – 336 s.
6. Slivinskaya, A.G. Elektromagnity i postoyannye magnity: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov / A.G. Slivinskaya. – Moskva: Energiya, 1972.

Zlobin Sergey Nikolaevich

Orel State university, Orel
Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical engineering
E-mail: zsn2@rambler.ru

Korchagin Vadim Olegovich

Russian University of Transport (MIIT), Moscow
Associate Professor of the Department «Traction rolling stock»
E-mail: otvet111333@gmail.com

© Злобин С.Н., Корчагин В.О., 2025

ЛО ЮАНЬ

КОМПЛЕКС ЗАДАЧ ТУГД ТЕОРИИ СМАЗКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОДШИПНИКАМ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИВОДОВ МОЩНЫХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Аннотация. Сделан анализ условий функционирования и требований к опорам роторов приводов главного движения мощных ветрогенераторов. Рассмотрена последовательность расчёта ресурса гидродинамических подшипников осей сателлитов планетарных мультиплликаторов. Сформирована методика решения термоупругогазодинамической задачи смазки гидродинамического подшипника. Представлены результаты расчета грузоподъемности, максимальных давлений, минимальных зазоров, моментов трения упругих деформаций и зон смешанной смазки при предельных режимах нагружения.

Ключевые слова: приводы ветрогенераторов, планетарные мультиплликаторы, оси сателлитов, гидродинамический подшипник, грузоподъёмность, термоупругогазодинамическая задача смазки, ресурс, моделирование.

1. Введение

С ростом глобальных преобразований энергетической структуры и усилением экологического сознания ветроэнергетика стала важной тенденцией развития в сфере глобальной энергетики. За последние десять лет, благодаря своим свойствам как чистого и возобновляемого источника энергии, ветроэнергетика утвердилась как установленная тенденция развития в глобальной энергетической сфере.[1] Объем мирового рынка ветроэнергетики в 2024 году оценивался примерно в 175 млрд. долларов США и ожидается его рост более чем на 11% в период с 2025 по 2034 год. Статистические данные свидетельствуют об историческом сдвиге в структуре производства электрической энергии, в частности, доля возобновляемых источников в Евросоюзе составила более половины общего объема, при этом использование угля уменьшилось почти на четверть. Повышение уровня использования ветровых турбин в Китае, Бразилии и Австралии также будет способствовать росту мировой ветроэнергетики.

Мощность ветрогенераторов составляет в настоящее время более тысячи ГВт, в том числе морского базирования 75 ГВт [2, 3]. Среднегодовой темп роста морской ветроэнергетики составляет более 10% за счет установки мощных турбин, широкого внедрения технологий плавучих станций и шельфовых проектов с глубинной установкой. Доминирующее направление развития в этой области энергетики связано с созданием ветровых энергоустановок мегаваттной мощности. В качестве примеров можно привести новую морскую установку CSSC Haizhuang мощностью 18 МВт с диаметром винта 260 метров и референсную ветряную турбину Датского технического университета мощностью 22 МВт с диаметром ротора 284 метра и высотой ступицы 170 метров [4, 5].

При увеличении номинальной мощности отдельных ветрогенераторов эксплуатационные условия их ключевых передачных узлов усложняются. Тяжело нагруженные подшипники скольжения для вращательного привода главной трансмиссии высокомощных ветрогенераторов в работе испытывают чрезвычайно высокие, сложные динамические нагрузки и широкий диапазон изменения скорости вращения. Они обычно применяются в опорах шпинделей спутниковых шестеренок планетарных коробок, являются ключевыми компонентами трансмиссии, и их смазочные свойства напрямую влияют на надежность и срок службы всей установки[6]. Подшипники скольжения ветрогенераторов отличаются низкой скоростью вращения, высокой нагрузкой, частыми изменениями условий работы, а также подвергаются изгибо-скручивающим нагрузкам, поэтому анализ их смазочных свойств и оптимизационное проектирование существенно отличаются от обычных подшипников скольжения. В главной трансмиссии высокомощных ветрогенераторов подшипники скольжения опор шпинделей спутниковых шестеренок планетарных коробок сталкиваются с экстремальными условиями: должны поддерживать хорошие смазочные

свойства при высоком удельном давлении, широком диапазоне температур и сложных колебаниях нагрузки. Особенно при запуске и остановах низкая скорость затрудняет образование масляной пленки, что легко приводит к прямому контакту металлических поверхностей, вызывая серьезное износ и нагрев[7]. С ростом мощности ветрогенераторов традиционная теория смазки на основе предположения жесткости не может точно прогнозировать фактические эксплуатационные свойства тяжелых подшипников скольжения[8].

В настоящее время проектируются ветрогенераторы мощностью более 20 МВт, вес машинных частей которых составляет более 300 тонн, а частоты вращения винтов не превышают 10 об/мин. Для привода крутящего момента с главного вала к генератору и повышения скоростей вращения используются планетарные мультипликаторы (Рисунок1), в качестве опор сателлитов которых для повышения ресурса в условиях высоких нагрузок применяют подшипники скольжения с жидкостным и граничным трением [9]. При проектировании данных опор возникает комплекс проблем, связанных с обеспечением подачи смазки в рабочую зону подшипников под высоким давлением, что исключает возможность применения гидростатических режимов. Работа в широком диапазоне изменения крутящих моментов, частот вращения и температур окружающей среды также требует учета этих факторов для реализации высоких требований к ресурсу и надежности ветрогенераторов.

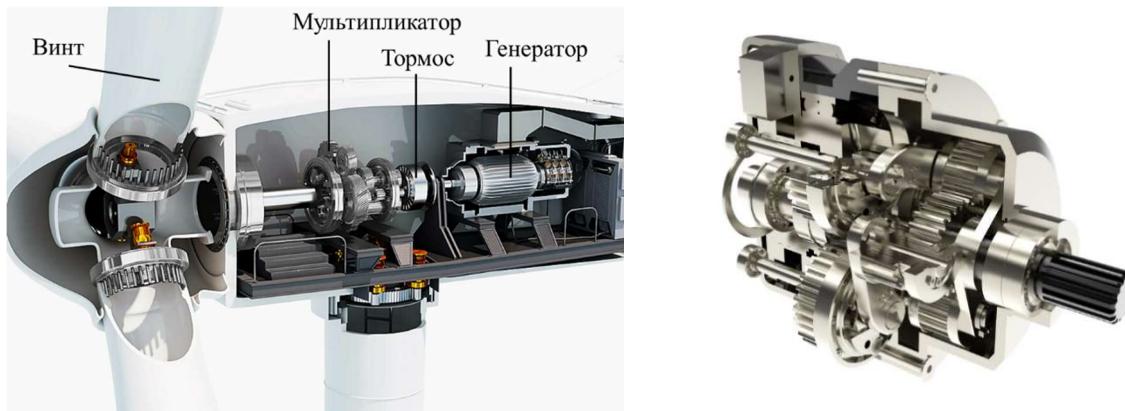


Рисунок 1 – Схема привода ветрогенератора и планетарный мультипликатор

2. Состояние исследований тяжело нагруженных ГДП

Гидродинамические подшипники, функционирующие в условиях значительного влияния упругих деформаций опорных элементов на минимальную толщину, давление и тепловые процессы в смазочном слое, применяются в высоконагруженных роторных агрегатах различных энергетических установок, транспортных и технологических машин. Гидродинамический клин создает несущую способность с жидкостным режимом, исключает механический контакт и определяет основные свойства подшипников, а именно, - высокую несущую способность с удельным давлением более 25 МПа; коэффициент трения 0.001 – 0.005 при установленном режиме работы; скорость скольжения до 80 м/сек; хорошие демпфирующие свойства и возможность восприятия динамических нагрузок. Номинальный диаметр подшипников скольжения входит в диапазон размеров от 140 до 1800 мм. Большинство опубликованных работ в этой области посвящено исследованию работоспособности опор скольжения крупных технологических систем, в частности, валков прокатных станов, работающих на реверсивных режимах при изменении скорости скольжения по величине и направлению в условиях высоких давлений и температур [7-8, 11]. Практическая целесообразность применения подшипников жидкостного трения в коробках скоростей ветроэнергетических установок способствовала появлению работ с результатами теоретических и экспериментальных исследований этих трибосопряжений [9-10].

Теоретической основой проектирования тяжело нагруженных опор скольжения служит упругогидродинамическая (УГД), а более широком аспекте

термоупругогидродинамическая (ТУГД) теории смазки, применяемые при расчетах как радиальных, так и упорных подшипников. Фундаментальные вопросы УГД смазки изложены в работах российских и зарубежных ученых последних десятилетий [12-14]. Следующий этап решения УГД задач применительно к радиальным подшипникам связан с появлением работ [14-16], в которых принималось допущение о деформации вала и втулки в зоне гидродинамических давлений в виде изменения радиусов кривизны, а радиальный зазор определялся двумя эксцентрическими окружностями. Однако проведенные экспериментальные исследования показали отличие действительного зазора в подшипниках при высоких нагрузках от кругло-цилиндрической формы. Применение численных методов позволяет использовать подход с последовательным решением уравнений гидродинамики и контактных деформаций [17]. Однако следует отметить, что итерационные процессы в опубликованных работах сходятся только при относительно небольших значениях деформаций, т.е. полученные таким образом результаты близки к решениям задачи с жесткими поверхностями. В данных работах в основном приводятся решения УГД задач при относительно небольших скоростях скольжения и удельной нагрузке не более 3 Мпа. Можно также отметить отсутствие решений данного вида задач в условиях пространственных деформаций поверхностей трения.

Отдельно следует остановиться на опубликованных результатах исследований подшипников скольжения приводов ветрогенераторов. Литература [18] на основе статистических данных указывает, что подшипники скольжения ветрогенераторных коробок передач из-за суровых условий эксплуатации, таких как переменные нагрузки и тепловые деформации, склонны к ранней неисправности. Эта проблема стимулировала прогресс исследований в области теории смазки - в современных исследованиях путем создания ТГД-модели (термоэластогидродинамической модели) с учетом пространственных деформаций была квантифицирована влияние несовпадения установки и абразивного износа на толщину масляной пленки, что стало теоретическим инструментом для анализа механизмов неисправностей. При этом, для решения проблемы недостаточной толщины масляной пленки (менее 2 мкм) на этапе запуска, соответствующие исследования предложили метод реального прогнозирования состояния смазки на основе температурных характеристик, благодаря чему была реализована практическая применение ТГД-теории в эксплуатации и техническом обслуживании.

3. Особенности функционирования опор осей сателлитов планетарных мультипликаторов ветрогенераторов

Подшипники скольжения осей сателлитов обеспечивают передачу кручущего момента со связанного с ветровым колесом водила, снижают потери на трение и в значительной мере осуществляют демпфирование колебательных процессов в элементах планетарной передачи. Анализ статистических данных может дать объективную информацию о функционировании подшипников в различных условиях работы, тем самым создавая основу для оптимизации конструкции при проектировании и диагностики неисправностей. В процессе эксплуатации в подшипниках валов приводов ветрогенераторов и в частности, коробок скоростей реализуются следующие режимы: 1) в нормальные условия работы подшипник испытывает умеренную нагрузку и минимальные потери на трение; 2) в периоды пуска и останова подшипники работают в условиях граничной и смешанной смазки, что связано с недостаточной несущей способностью гидродинамического клина при небольших скоростях сдвига или разрывами масляной пленки, что может привести к резкому увеличению потерь на трение и быстрому повышению температуры; 3) состояние перегрузки в случае превышения расчетного значения нагрузка на подшипник, что приводит к увеличению потерь на трение, повышению температуры и другим осложнениям; 4) усталостное состояние рабочих поверхностей подшипника при действии значительных переменных нагрузок в течение длительного периода времени, что может привести к усталостному повреждению; 5) неисправное рабочее состояние, при котором подшипник скольжения может столкнуться с износом и разрушением.

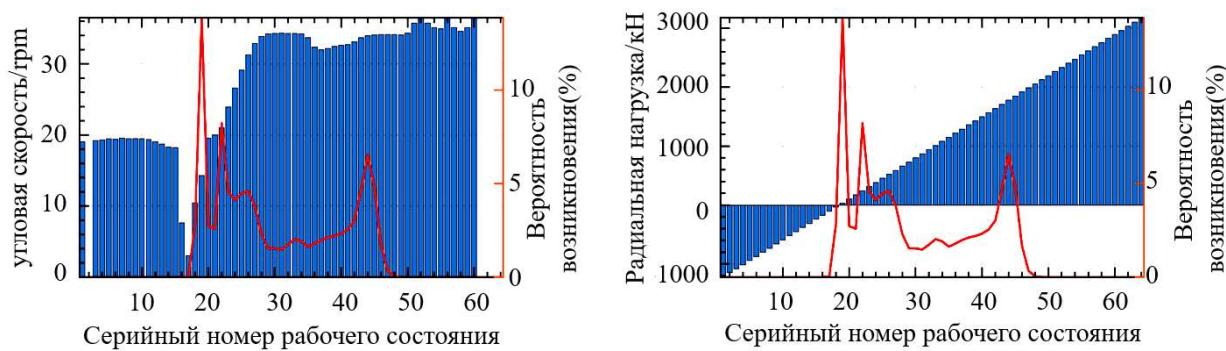


Рисунок 2- Основные режимы работы опор скольжения осей сателлитов планетарных мультиликаторов

На рисунке 2 представлен спектр нагрузок ветра в определенной местности установки ветрогенераторных станций, на основании которого можно определить условия нагружения элементов. Красной линией на рисунках 2 показано количество условий, возникающих на протяжении всего жизненного цикла ветрогенератора, что в отражает вероятность возникновения каждого условия. Гистограмма, напротив, соответствует различным условиям, связанным со скоростью вращения сателлитов и радиальной нагрузкой. Соотношение представленных данных позволяет сделать вывод, что в течение полного жизненного цикла более 99 % времени элементы ветрогенератора работают в нормальных условиях и около 1% времени в условиях, связанных с пуском-остановкой, отказом или другими особыми обстоятельствами.

На этом основании можно рассмотреть два возможных варианта развития рабочего процесса в подшипниках осей сателлитов: В нормальных условиях работы, когда в подшипниках скольжения реализуется режим жидкостного трения потери на трение относительно незначительны, температура смазочного материала находится в пределах нормы, а износ и повреждения рабочих поверхностей мало вероятны, основное внимание следует уделять обеспечению чистоты смазки и решению других вопросов. Это необходимо для того, чтобы планомерно реализовывался цикл подачи, очистки и охлаждения смазочного материала, чтобы избежать аномальных режимов, связанных с возникновением вибраций и износом. В особых условиях работы, таких как пуск и останов, отсутствие вращения при вынужденной остановке ветрового колеса, появления усталостных трещин в элементах трибосопряжения и т.д., подшипники подвержены значительному фрикционному износу и знакопеременным нагрузкам. Кроме того, планетарное колесо демонстрирует различную степень смещения при воздействии разнонаправленных нагрузок и под влиянием разнонаправленного ветра. Замечено, что смещение уменьшается с увеличением нагрузки, что необходимо учитывать этот фактор при проведении расчетов.

4. Составляющие компоненты ТУГД задачи смазки подшипников

Проектирование подшипников скольжения в общем случае включает проектный этап и комплекс проверочных расчетов стационарных и динамических характеристик, которые основываются на определении полей давлений в смазочном слое. Для повышения точности расчетов целесообразно проводить решение взаимосвязанных задач моделирования гидродинамических и тепловых процессов, а также напряженно-деформированных состояний конструктивных элементов в стационарной, квазистационарной или нестационарной постановке. Выделяют уровни моделирования на основе гидродинамической постановки, термогидродинамической теории (ТГД) смазки, в рамках которой рассматриваются зависимости давлений и реакций смазочного слоя от изменения температуры, теплофизических параметров, режимов течения и геометрии радиального зазора в подшипнике, а также упругогидродинамической (УГД) теории, предполагающей совместное решение уравнений гидродинамики и теории упругости. В общем случае расчета с учетом перечисленных факторов решение проводится на основе комплекса соотношений термоупругогидродинамической (ТУГД) теории смазки. В данной работе представлена

информация по постановке ТУГД задач смазки и расчету несущей способности (грузоподъемности), потерь мощности на трение, ресурса работы, полей давлений и минимальных радиальных зазоров 360-градусного гидродинамического подшипника (рисунок 3) с учетом переменных теплофизических свойств смазочного материала и упругих деформаций опорных элементов. Рассмотрен также подход к решению практически важной задачи по прогнозированию ресурса работы гидродинамических подшипников приводов ветрогенераторов при известных значениях интенсивности износа антифрикционных материалов втулок.

На первом этапе проектирования расчеты, как правило, проводят в изотермической постановке при постоянных значениях коэффициента вязкости и ламинарном режиме течения смазки. Основой расчета в данной постановке задачи служит уравнение Рейнольдса в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 3\mu\omega d \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

где h – радиальный зазор, функция распределения которого без учета перекоса вала в декартовой системе координат записывается $h = h_0 - X \sin \alpha - Y \cos \alpha$; P – давление в смазочной пленке; d – диаметр подшипника; ω – угловая скорость; μ – коэффициент динамической вязкости; e, φ, α, X, Y – координаты, определяющие положение центра цапфы.

Более точный уровень моделирования связан с расчетом давлений с учетом переменных теплофизических свойств в различных зонах смазочного слоя подшипника. В этом случае модифицированное уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\mu k_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{\mu k_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 3\omega D \frac{\partial (\rho h)}{\partial x} \quad (2)$$

На этапе проведения проверочных расчетов моделирование полей давлений в подшипнике при определении несущей способности, моментов трения и динамических характеристик может проводиться в общем случае с учетом изменения теплофизических свойств в смазочном слое, влияния инерционных эффектов, турбулентных режимов течения и нестационарных движений опорной части вала на основе решение модифицированного уравнения Рейнольдса [19],

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho h^3}{\mu K_x} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho h^3}{\mu K_z} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho U h) - 12 \rho V + 12 h \frac{\partial \rho}{\partial t} + In \quad (3)$$

где слагаемое In в правой части уравнения характеризует влияние локальных и конвективных членов инерции; U и V – скорости на поверхности цапфы, которые находятся в полярной системе координат $U = \omega R - \dot{e} \sin(\alpha - \varphi) + e \dot{\varphi} \cos(\alpha - \varphi)$; $V = \dot{e} \cos(\alpha - \varphi) + e \dot{\varphi} \sin(\alpha - \varphi)$; а

в в декартовой системе координат $U = \omega R + \dot{X} \cos \alpha - \dot{Y} \sin \alpha$; $V = \dot{X} \sin \alpha + \dot{Y} \cos \alpha$.

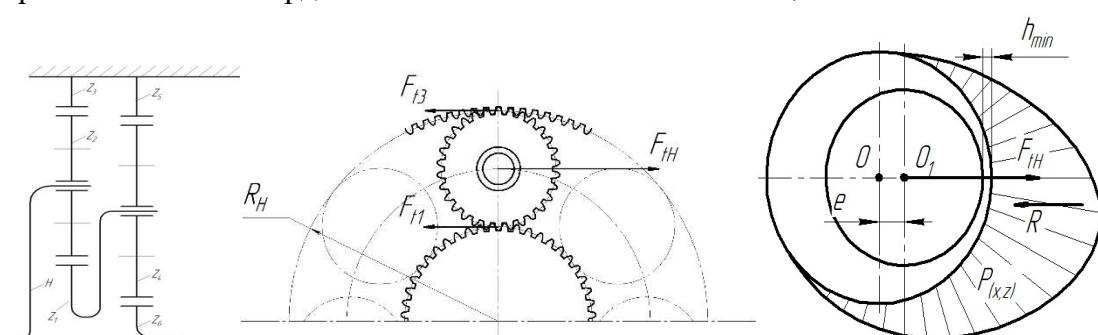


Рисунок 3- Схема планетарного мультипликатора и подшипника сателлита

Система уравнений для расчета давлений является недоопределенной, т. к. число неизвестных параметров (p , ρ , T , μ) превышает число уравнений. Дополнительными

соотношениями являются зависимости теплофизических свойств смазочного материала от давления и температуры, а также уравнение состояния, связывающее плотность, давление и температуру:

$$\mu = \mu(p, T); f(p, \rho, T) = 0 \quad (4)$$

Табличные данные теплофизических свойств смазочного материала были аппроксимированы и представлены аналитическими зависимостями в виде функций давления и температуры.

При больших диаметрах опорных частей осей и валов возможен переход к турбулентному режиму течения смазочного материала, который характеризуется числами Рейнольдса более сверхкритических значений

$$Re > Re^{kp}; \quad Re = 2 \frac{\rho U_m h}{\mu} \approx \frac{\rho \omega R h}{\mu}; \quad Re^{kp} \approx 2000.$$

Влияние турбулентности учитывается введением соответствующих коэффициентов K_x и K_z , которые для гидродинамических подшипников определяются с использованием следующих соотношений [19]:

$$K_x = 1 + 0,044(k^2 \text{Re})^{0.725}; \quad K_z = 1 + 0,0247(k^2 \text{Re})^{0.65}$$

где k^* – коэффициент Кармана, который может принимать различные значения $k^* \approx 0.2 \dots 0.4$; малые значения k^* соответствуют малым зазорам $h = 10 \dots 100$ мкм. Часто используют эмпирическую зависимость: $k^* = 0,125 Re^{0.07}$.

Неизотермическая постановка задачи расчета полей давлений в подшипнике достигается включением в математическую модель уравнения баланса энергий (1), в которой изменение энергии в фиксированной точке смазочного слоя происходит вследствие конвективной теплопроводности внутри несущей пленки, кондуктивного теплообмена с окружающими поверхностями вала и втулки, работы расширения в сжимаемой среде, а также диссипации при вязком трении сдвига.

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \nabla T) + \beta \cdot T \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \mu \cdot \Phi, \quad (5)$$

где T , ρ , C_p , λ , μ – температура, плотность, теплоемкость, коэффициент динамической вязкости смазочного материала; Φ – диссипативная функция.

В стационарной постановке при рассмотрении несжимаемой смазочной среды уравнение энергий принимает следующий вид:

$$\rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \cdot V_x + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot V_z \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \mu \cdot \Phi \quad (6)$$

В случае адиабатической постановки не учитывается теплообмен с поверхностями втулки и вала, т. е. рассматривается установившийся тепловой режим с равенством температур смазочного слоя и окружающих контактных стенок. В изотермических моделях температура принимается одинаковой во всех точках смазочного слоя и определяется при решении уравнений теплового баланса значений диссипативной и отведенной теплоты. При подаче смазочного материала в зону трения с высоким давлением ($P > 1$ МПа) быстротечность смазочного процесса позволяет пренебречь влиянием теплопроводности внутри несущего слоя. В этом случае при отсутствии теплообмена с опорными поверхностями и незначительным влиянием градиентов скоростей v_x и v_z в направлении осей x, z , и малыми значениями скоростей v_y в функции диссипации, уравнение энергий примет вид:

$$\rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \cdot V_x + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot V_z \right) = \mu \cdot \left(\left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (7)$$

Расчет упругих деформаций оси сателлита под действием гидродинамических сил смазочного слоя позволяет сформировать новую функцию радиального зазора для проведения следующего этапа термогидродинамического расчета. В данном случае реализация этой процедуры выполнялась для оси с бронзовой втулкой (Рисунок 4, а) в

программном комплексе конечно-элементных расчётов APM Win Structure 3D [20]. Условия закрепления оси предполагали жесткую заделку в корпусе водила, а коэффициент жесткости правой опоры принят равным 4000 Н/м на основании предварительных расчетов в системе Ansys. Нагрузка на ось задана в виде распределённой гидродинамической силы и изгибающего момента Ma от действия сил в зацеплении косозубой передачи.

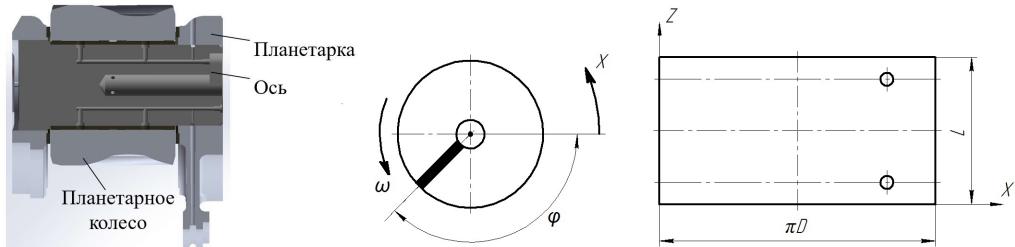


Рисунок 4 - Схема подшипника

На рисунке 5 представлены аппроксимированные функции деформированной упругой линии оси при действии максимальной радиальной силы и изгибающих моментов. Несимметричность эпюры перемещений связана с разной жесткостью закреплению частей оси. Максимальные линейные перемещения u составляют около 70 мкм, что соизмеримо с величинами радиального зазора. Расчетные максимальные напряжения изгиба в оси значительно меньше предельных значений (не более 110 Мпа в опасном сечении), что свидетельствует о достаточной прочности конструкции подшипникового узла.

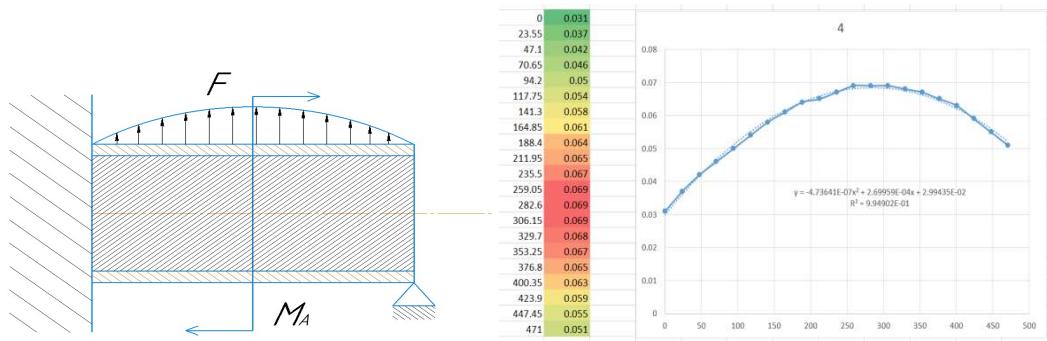


Рисунок 5 - Аппроксимированные функции действующих нагрузок и линия перемещений

5. Схема решения ТУГД задачи смазки тяжело нагруженных гидродинамических подшипников

Расчет давлений в смазочном слое подшипников жидкостного трения представляет собой краевую задачу, для решения которой должны быть записаны граничные условия, в качестве которых принимаются заданные значения давлений и температур:

1) заданное давление на входе в подшипник P_0 и на слива p_a (на торцах подшипника) :

$$p(x, 0) = p_{a_1}; \quad p(x, L) = p_{a_2}; \quad p(x_{H_n}, z_{H_n}) = p_{H_n} \quad (8)$$

2) условия сопряжения по координате x для 360-градусного подшипника:

$$p(0, z) = p(2\pi R, z); \quad \frac{\partial p}{\partial x}(0, z) = \frac{\partial p}{\partial x}(2\pi R, z) \quad (9)$$

Граничными условиями при решении уравнения баланса энергий служат значения температур на линии питающих камер.

В результате интегрирования полей давлений можно получить значения гидродинамических сил в проекциях на оси координат и момент трения::

$$R_x = - \int_0^L \int_0^{\pi D} p \sin \alpha \{ \beta \} dx dz; R_y = - \int_0^L \int_0^{\pi D} p \cos \alpha \{ \beta \} dx dz \quad (10)$$

$$M_{R_x} = \int_0^L \int_0^{\pi D} \left(z - \frac{L}{2} \right) p \cos \alpha dx dz; M_{R_y} = - \int_0^L \int_0^{\pi D} \left(z - \frac{L}{2} \right) p \sin \alpha dx dz; \quad (11)$$

Суммарное значение грузоподъемности подшипника будет равно:

$$W = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (12)$$

Описанные выше подзадачи объединены прямой итерационной схемой расчёта (рисунок 6), которая включает задание исходных данных и функции радиального зазора, расчет полей давлений и температур, перемещений опорной поверхности оси, грузоподъемности и моментов трения подшипника. Итерационная структура вычислительной процедуры предполагает новый этап решения в случае расхождений расчетных значений давлений с предыдущей итерацией.

Численная реализация представленных расчетных соотношений проводилась на основе сформированного алгоритма с использованием методов решения дифференциальных уравнений в системе Matlab.

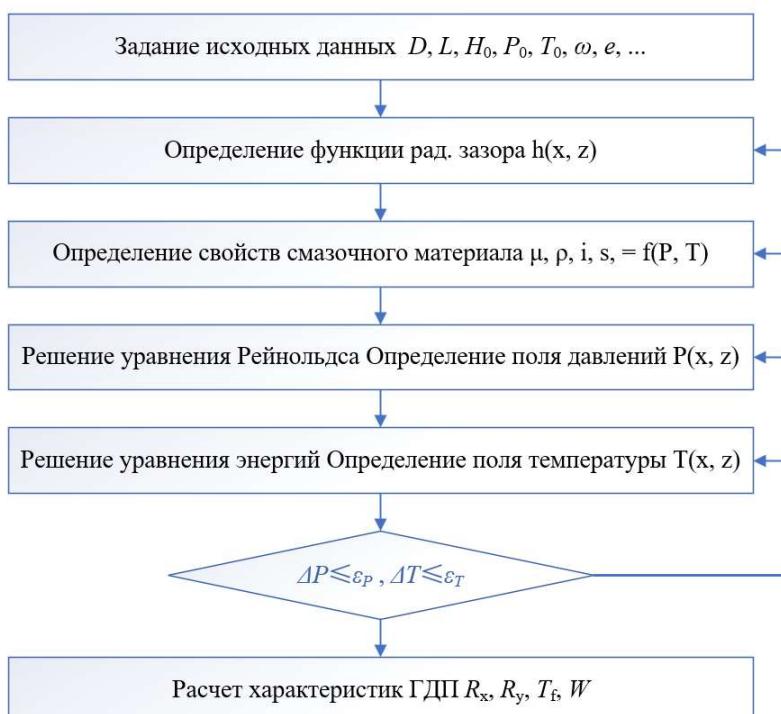


Рисунок 6 – Блок-схема решения ТУГД задачи смазки

6. Результаты моделирования характеристик подшипников

Моделирование и расчет характеристик было выполнено для наиболее нагруженного подшипника сателлита 1-й ступени планетарного мультипликатора (Рисунок 4). Прежде всего, отметим некоторые особенности функционирования данной опоры. Втулка с антифрикционным слоем размещена на оси, закрепленной на водиле и совершающей вместе с сателлитом планетарное движение. По сути дела в этом трибосопряжении определяющим в создании несущей способности является вращение сателлита относительно своей оси, что требует учета этого факта при выводе уравнений движения смазки в конфузорно-диффузорном зазоре. Подача смазки осуществляется дроссельными отверстиями в оси и подводится через систему каналов в водиле. Уровень давлений подачи на входе в подшипник составляет не более 0.3 МПа.

На критических режимах работы при крутящем моменте T_b на ветроколесе около 10 тысяч кН м окружная сила F_{th} на один подшипник при числе сателлитов 7 будет равна $F = T_b k_c / R_h c$, где c - число сателлитов; k_c – коэффициент неравномерности распределения между

зубчатыми колесам и составит более 2200 кН. Удельное давление при заданном диаметре $D = 335$ мм и длине опорной части $L = 470$ мм будет составлять $P = 13.2$ МПа. На максимальном режиме работы эта величина будет на 30% меньше. Предварительный анализ и результаты экспериментальных данных показали, что максимальные деформации оси под действием гидродинамических сил соизмеримы с величиной радиального зазора

Для данного исследования был выбран смазочный материал Mobil SHC Gear 320WT. Динамика изменения его основных теплофизических свойств в зависимости от температуры представлена на рисунке 7

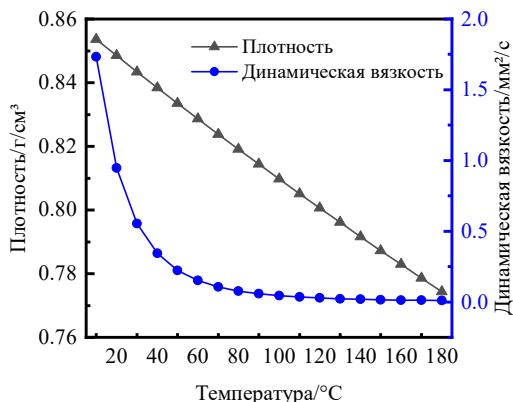


Рисунок 7– Зависимость теплофизических свойств от температуры

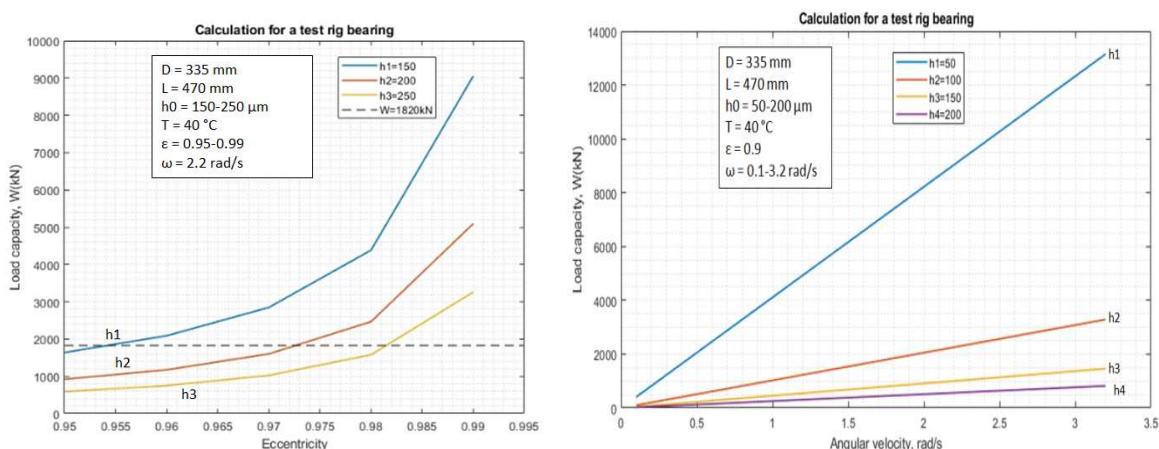


Рисунок 8– Зависимость грузоподъемности ГДП от радиального зазора, относительного эксцентризитета и вязкости

На рисунке 8 представлены результаты расчета грузоподъемности подшипника диаметром 335 мм и длиной 465 мм с целью оценки условий работы при критической нагрузке, которая по требованиям заказчика предполагала возможность увеличения максимального значения сил на 30%. При проведении расчетов использовались значения радиального зазора в диапазоне $h=50-250$ мкм, что позволяет оценить этого параметра влияние величинам зазоров для выбранной посадки оси во втулке. Гарантированное наличие режима жидкостной смазки для всего диапазона зазоров обеспечивается при относительных эксцентризитетах более 0.98, что свидетельствует о возможности появления зон с граничной смазкой с учетом влияния шероховатости поверхностей. Дело в том, что использованная в программе модель расчета предполагает принятые в гидродинамической теории смазки допущение о гладкости опорных поверхностей и бесконечный рост гидродинамических реакций при стремлении к нулю минимального зазора. Для повышения несущей способности подшипника в данном случае и обеспечения жидкостного режима работы следует

рекомендовать увеличение диаметр подшипника до 340 мм или использовать масло с более высоким коэффициентом динамической вязкости.

Верификация результатов моделирования УГД задачи проводилась на основе сравнения с данными, полученными в специализированной программе DLAP [5]. На рисунке 9 представлен фрагмент программы с окнами для ввода исходных данных с параметрами подшипника и заданными нагрузками. Коэффициент зазора, отображаемый на экране, представляет собой отношение зазора масляной пленки к радиусу. На экране задан способ и место ввода смазочного материала, сорт масла, коэффициент динамической вязкости и температура. Следует отметить, что полученные результаты с использованием разработанной модели в значительной мере соответствуют данным, представленным на рисунке 9.

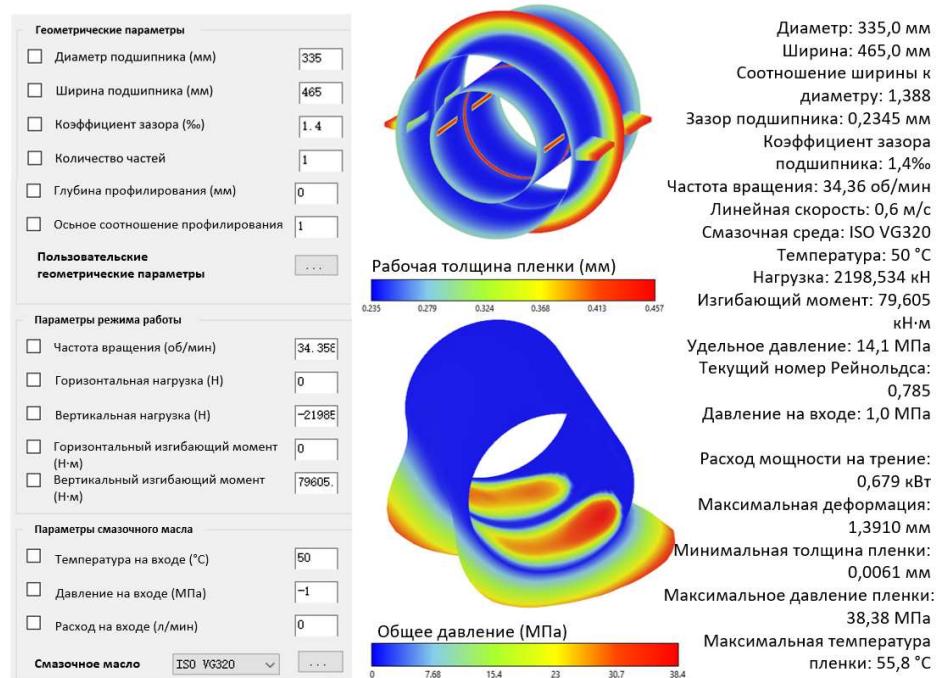


Рисунок 9 – Окно ввода данных подшипника и результатов расчета

7. Заключение

В материалах статьи изложен подход к моделированию тяжело нагруженных гидродинамических подшипников осей сателлитов планетарных мультипликаторов. Рассмотрен комплекс взаимосвязанных задач ТУГД теории смазки для определения основных стационарных характеристик реальных подшипников, выпуск экспериментальных образцов которых осуществляется китайским заводом ZOB для нового поколения мощных ветровых генераторов. Автор данной статьи участвовала в проведении серии расчетов в рамках проектирования этих изделий. Логика изложения представленных материалов в рамках рекомендуемого объема статьи позволила представить только базовые расчетные соотношения, включающие модифицированные варианты уравнения Рейнольдса для давлений, уравнение энергий, а также дополнительные соотношения для определения функции радиального зазора, зависимости теплофизических свойств от температуры и коэффициентов турбулентности. Уравнения упругости для расчета деформаций опорной оси не приведены, поскольку расчеты напряженно-деформированного состояния биметаллической оси и перемещений рабочей поверхности проводились в автоматизированной системе АПМ, которая позволяет на основе МКЭ решать подобные задачи с высоким уровнем точности. Проведенные результаты свидетельствуют о работе ГДП осей сателлитов первой ступени планетарного мультипликатора в режиме жидкостного трения на основных режимах работы. Появление переходных зон к ганичной и смешанной смазке наблюдалось только на критических режимах, время работы на которых составляет в пределах

1% от всего периода эксплуатации ветрогенератора. Для оценки ресурса работы при граничной смазке необходимо выполнить решение задачи износа при известных значениях скорости изнашивания для выбранного антифрикционного материала.

Полученные результаты позволяют оценить возможности работы гидродинамических подшипников функционировать в режиме жидкостной смазки на максимальных и предельных режимах нагружения. При выполнении проверочных расчетов опор скольжения мультипликаторов на этапах технического проекта, представленная модель позволяет проводить оптимизацию параметров путем выполнения серии расчетов в условиях высоких нагрузок и низких скоростей вращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen Q. et al. Development status of design and performance testing technology for wind turbine sliding bearings // Bearing. – 2023. – Т. 6. – С. 14-19.
2. Polinder H. Overview of and trends in wind turbine generator systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. P. 1–8.
3. Hansen A. Hanswn L. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2004). Wind Energy , 2007, 10(1) : 81-97.
4. Zhu W. D., Wang X. F. Design, Modeling and Simulation of a Geared Infinitely Variable Transmission // Journal of Mechanical Design. 2014. Vol. 136 (7). P. 071011–071011-9.
5. Diepeveen N. F. B. On the application of fluid power transmission in offshore wind turbines. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2013.
6. Li W. et al. Study on heavy-duty journal bearing lubrication based on Elasto-hydrodynamic lubrication method // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1314. – №. 1. – С. 012117.
7. Cui Shui. Study on Coating Wear and Thermal Sliding Characteristics during Starting and Stopping of High-Speed Heavy-Loaded Radial Bearings[D]. Harabin: Harabin Polytechnic University, 2021. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.005470.
8. Bouyer J., Fillon M. On the significance of thermal and deformation effects on a plain journal bearing subjected to severe operating conditions // J. Trib. – 2004. – Т. 126. – №. 4. – С. 819-822.
9. Skaare B., Hörnsten B., Nielsen F. G. Modeling, simulation and control of a wind turbine with a hydraulic transmission system // Wind Energy. 2013. Vol. 16 (8). P. 1259–1276.
10. Усов П. П. Влияние упругих деформаций на несущую способность тяжелонагруженных опор скольжения жидкостного трения // ТРИБОЛОГИЯ–МАШИНОСТРОЕНИЮ. – 2022. – С. 274-278.
11. Усов П. П. Численный анализ характеристик слоя смазки в опорном подшипнике скольжения при реверсивном движении // Прикладная математика и механика. – 2018. – Т. 82. – №. 3. – С. 290-299.
12. Piffeteau S., Souchet D. Influence of Thermal and Elastik Deformations on Connecting-Rod Big End Bearing Lubrication Under Dynamic Loading// Journal of Tribology July 2000 Voll. 122(1). pp. 181-191.
13. Abdel-Aal, Hisham A. - On the Influence of Thermal Properties on Wear Resistance of Rubbing Metals at Elevated Temperatures. Journal of Tribology July 2000 Voll. 122(1). pp. 657-660(TB).
14. Hozhenjuk N. The Solution Algorithm of Elastohydrodynamic Lubricant of Conneking-rod Bearing. Bullet of SUSU. Mechanical Engineering Series. 2009. Vol 14.
15. Рождественский Ю.В., Хозенюк Н.А. УГД задача смазки сложнонагруженных опор скольжения//Авиационная ракетно-космическая техника, 2009. – с.57-62.
16. Савин Л.А., Соломин О.В. , Устинов Д.Е., Пугачев А.О. Автоматизированный расчет роторных машин: монография – М.: Машиностроение-1, 2006. – 368 с.
17. Shengbo Li, Alexander Babin, Denis Shutin, Yu N Kazakov, Leonid Savin Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning Tribology International 175(4):107805.
18. Bindingsbø O T, Singh M, Øvsthus K, et al. Fault detection of a wind turbine generator bearing using interpretable machine learning[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1284676.
19. Савин Л А, Соломин О В. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения[J]. М.: Машиностроение-1, 2006, 444.
20. Настепанин К.К., Хан Ю., Ли Ш., Савин Л.А. Влияние деформаций осей сателлитов планетарных мультипликаторов на грузоподъемность подшипников скольжения // Известия ТулГУ. 2023. Вып. 3. с.35-41.

Ле Юань

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Аспирантка кафедры мехатроники, механики и робототехники
E-mail:839730024@qq.com

LUO YUAN

COMPLEX OF TECHNICAL TASKS IN LUBRICATION THEORY APPLICABLE TO SLIDING BEARINGS OF HIGH-POWER WIND TURBINE DRIVES

Abstract. An analysis of the operating conditions and requirements for rotor supports in the main drive systems of high-power wind turbines has been conducted. The sequence for calculating the service life of hydrodynamic bearings for satellite shafts in planetary gearboxes is considered. A methodology for solving the thermo-elastohydrodynamic lubrication problem of hydrodynamic bearings has been developed. The results of calculating load-carrying capacity, maximum pressures, minimum clearances, friction torques, elastic deformations, and mixed lubrication zones under extreme loading conditions are presented.

Keywords: wind turbine drives, planetary gearboxes, satellite shafts, hydrodynamic bearing, load-carrying capacity, thermo-elastohydrodynamic lubrication problem, service life, simulation

BIBLIOGRAPHY

1. Chen Q. et al. Development status of design and performance testing technology for wind turbine sliding bearings // Bearing. – 2023. – T. 6. – C. 14-19.
2. Polinder H. Overview of and trends in wind turbine generator systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. P. 1-8.
3. Hansen A. Hansn L. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2004). Wind Energy, 2007, 10(1) : 81-97.
4. Zhu W. D., Wang X. F. Design, Modeling and Simulation of a Geared Infinitely Variable Transmission // Journal of Mechanical Design. 2014. Vol. 136 (7). P. 071011-071011-9.
5. Diepeveen N. F. B. On the application of fluid power transmission in offshore wind turbines. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2013.
6. Li W. et al. Study on heavy-duty journal bearing lubrication based on Elasto-hydrodynamic lubrication method // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – T. 1314. – №. 1. – C. 012117.
7. Cui Shui. Study on Coating Wear and Thermal Sliding Characteristics during Starting and Stopping of High-Speed Heavy-Loaded Radial Bearings[D]. Harbin: Harbin Polytechnic University, 2021. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.005470.
8. Bouyer J., Fillon M. On the significance of thermal and deformation effects on a plain journal bearing subjected to severe operating conditions // J. Trib. – 2004. – T. 126. – №. 4. – C. 819-822.
9. Skaare B., Hörnsten B., Nielsen F. G. Modeling, simulation and control of a wind turbine with a hydraulic transmission system // Wind Energy. 2013. Vol. 16 (8). P. 1259-1276.
10. Усов П. П. Влияние упругих деформаций на несущую способность тяжелонагруженных опор скольжения жидкостного трения // ТРИБОЛОГИЯ-МАШИНОСТРОЕНИЮ. – 2022. – С. 274-278.
11. Усов П. П. Численный анализ характеристик слоя смазки в опорном подшипнике скольжения при реверсивном движении // Прикладная математика и механика. – 2018. – Т. 82. – №. 3. – С. 290-299.
12. Piffeteau S., Souchet D. Influence of Thermal and Elastik Deformations on Connecting-Rod Big End Bearing Lubrication Under Dynamic Loading // Journal of Tribology July 2000 Voll. 122(1). pp. 181-191.
13. Abdel-Aal, Hisham A. - On the Influence of Thermal Properties on Wear Resistance of Rubbing Metals at Elevated Temperatures. Journal of Tribology July 2000 Voll. 122(1). pp. 657-660(TB).
14. Hozhenjuk N. The Solution Algorithm of Elastohydrodynamic Lubricant of Connecting-rod Bearing. Bullet of SUSU. Mechanical Engineering Series. 2009. Vol 14.
15. Рождественский Ю.В., Хозенюк Н.А. УГД задача смазки сложнонагруженных опор скольжения // Авиационная ракетно-космическая техника, 2009. – с.57-62.
16. Савин Л.А., Соломин О.В., Устинов Д.Е., Пугачев А.О. Автоматизированный расчет роторных машин: монография – М.: Машиностроение-1, 2006. □ 368 с.
17. Shengbo Li, Alexander Babin, Denis Shutin, Yu N Kazakov, Leonid Savin Active Hy-brid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning Tribology Interna-tional 175(4):107805.
18. Bindingsbø O T, Singh M, Øvsthus K, et al. Fault detection of a wind turbine generator bearing using interpretable machine learning[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1284676.
19. Savin LA, Solomin OV. Modeling of rotor systems with fluid friction supports[J]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2006, 444.
20. Nastepanin KK, Khan Yu., Li Sh., Savin LA. Effect of planetary gear axes deformations on the load-carrying capacity of plain bearings // Bulletin of Tula State University. 2023. Issue 3. pp. 35-41.

Luo Yuan

Orel State University

Graduate student of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics

E-mail: 839730024@qq.com

© Ло Юань, 2025

ГРИБАНОВ Е.Н., АНАНЬКО А.С., ПУГАЧЁВ А.В., ВАСИЛЬЕВ К.В.

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КРАСИТЕЛЕЙ В ВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. В работе показана возможность применения искусственных нейронных сетей для определения концентрации пищевых красителей (E102, E110, E122, E129, E133 и E155) в модельных водных системах. Для этого создана база, включающая ~ 500 спектров поглощения многокомпонентных модельных водных растворов с различной концентрацией определяемых веществ, число реперных точек для обучения нейронной сети составляло ~5500. На основе данной базы проведено обучение нейросети, определена значимость каждого входного параметра. Показана возможность анализа аналитического сигнала с помощью нейронной сети при определении аналитиков, изучаемых в работе, при их совместном присутствии. Обученная нейронная сеть продемонстрировала возможность количественного и качественного анализа смесей красителей. Точность разработанной модели на тестовой выборке составила 84,2% (корректного определения концентрации в пробах). Полученные данные представляют интерес при автоматизации работы роботизированных систем при необходимости принятия решений в зависимости от химического состава окружающей среды, содержащей пищевые красители.

Ключевые слова: нейронная сеть, химический анализ, автоматизация, роботизированные системы.

Искусственные нейронные сети нашли широкое применение при прогнозном анализе на основе большого массива данных динамически изменяющихся переменных в нестационарных сценариях функционирования систем. Это соответствует принципу адаптивного управления и теории обучения на основе опыта, что необходимо при проектировании и создании мехатронных и робототехнических комплексов. В таких системах, функционирующих в условиях параметрической и структурной неопределенности, требуется обеспечение устойчивости по отношению к широкому спектру внешних стохастических возмущений [1-3]. Необходимо отметить высокий потенциал технологии искусственного интеллекта для обработки экстремально больших объемов слабоструктурированных данных, поступающих в режиме реального времени от сенсорных (мультисенсорных) систем. Одним из применений таких систем является решение комплексных задач мониторинга и химического анализа объектов окружающей среды, что находит отражение в современных исследовательских работах [4-8].

При проведении химического анализа многокомпонентных объектов, характеризующихся сложным химическим составом, нейронные сети демонстрируют высокую эффективность в построении нелинейных многопараметрических регрессионных моделей, устанавливающих взаимосвязь между исходными данными – аналитическим сигналом сенсора и целевыми свойствами системы. Классические методы хемометрики зачастую несостоятельны для прямой интерпретации аналитического сигнала в подобных условиях по причине значительного перекрывания аналитических сигналов от отдельных компонентов смеси, что приводит к коллинеарности данных и делает невозможным их строгую аддитивную декомпозицию [9-11]. Нейронные сети позволяют нивелировать указанные фундаментальные проблемы за счет прямого анализа интегрального (суммарного) аналитического сигнала от всей совокупности компонентов системы. Реализуя аппроксимацию сложных нелинейных функций, искусственные нейронные сети способны обеспечить роботизированным и автоматизированным системам возможность осуществлять адекватную и оперативную кластеризацию данных, регрессионный анализ и, как следствие, принимать обоснованные решения в условиях ограниченного временного ресурса.

Вместе с тем, развитие и внедрение методов машинного обучения в область аналитической химии ограничены рядом методологических сложностей. К ним, в первую очередь, относится необходимость формирования обширного набора данных (DataSet), который может включать до нескольких тысяч репрезентативных проб, подготавливаемых, как правило, рутинными операциями химического анализа для целей обучения модели.

Помимо этого, отсутствие универсальных и четко формализованных критериев к формированию репрезентативной и сбалансированной обучающей выборки, что напрямую соотносится с теорией статистического обучения и проблемой смещения выборки, создает значительные барьеры для разработки генерализующих моделей и внедрения методов машинного обучения в проведение химического анализа и его автоматизации.

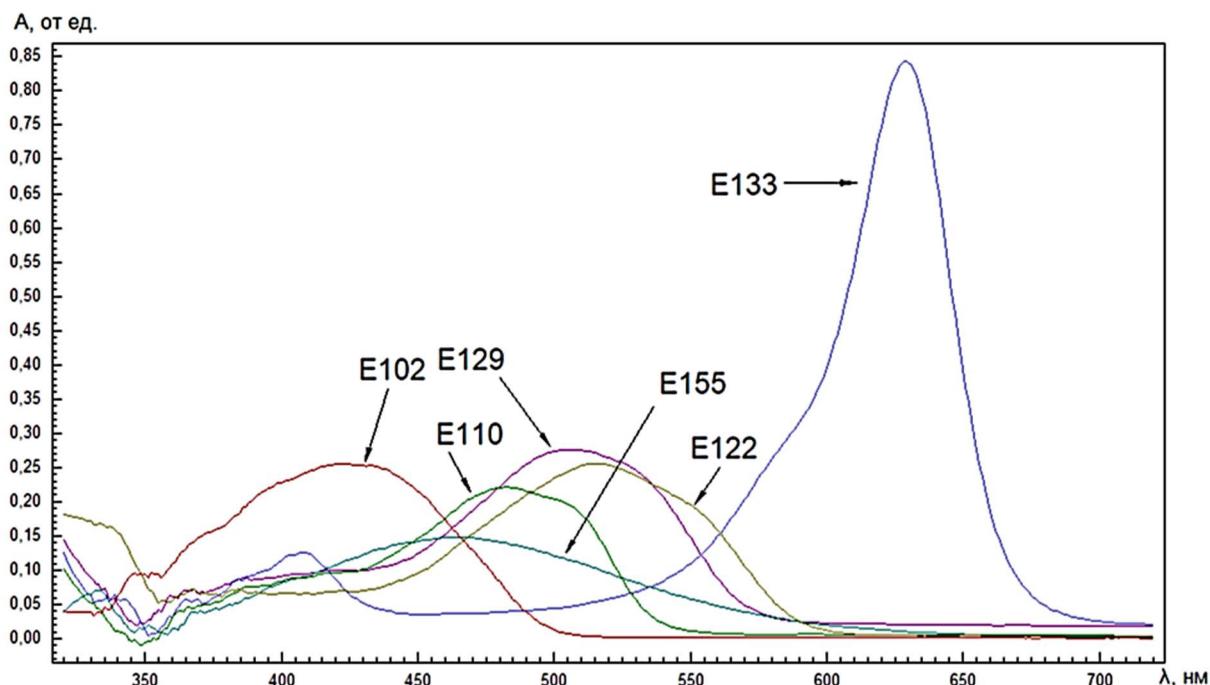
Целью настоящей работы явилось систематическое изучение возможности анализа результатов спектрофотометрического определения модельных органических веществ в сложных многокомпонентных системах с помощью нейронных сетей для дальнейшего применения в дизайне и конструировании автоматизированных систем.

Материалы и методы. В качестве модельных систем выбраны пищевые красители E102, E110, E122, E129, E133 и E155. При попадании в организм человека в дозах, превышающих допустимые они способствуют развитию сильных аллергических реакций, кожных заболеваний, астмы, возникновению опухолей [12]. Концентрации красителей в водных системах составляли от 0 мг/л до 6,0 мг/л.

Спектры поглощения изучаемых систем регистрировали на спектрофотометре СФ-56. Для анализа данных и обучения использовали нейромедиатор NeuroPro 0.25 [13].

Результаты и обсуждение.

Спектр поглощения исследуемых красителей в водных растворах представлен на рисунке 1. Из рисунка видно существенное перекрывание полос поглощения красителей и невозможность их индивидуального определения при совместном присутствии с помощью традиционных подходов и математических моделей, основанных на аддитивности оптической плотности.



*Рисунок 1 – Спектр поглощения водных растворов красителей.
Концентрация каждого красителя составляет 6,0 мг/л*

В работе создана десятислойная нейронная сеть прямого распространения. Входной слой состоял из 12 нейронов, соответствующих реперным точкам (выбранные длины волн) в спектрах поглощения, изучаемых многокомпонентных систем.

Выходной слой насчитывал 6 нейронов, которые соответствовали концентрациям каждого из компонентов системы. Количество нейронов на всех скрытых слоях подбиралось экспериментально [14-16]. Обучающая выборка включала ~ 500 спектров систем, включающих в состав разные по химической природе красители в различных концентрациях.

Погрешность полей выводных данных устанавливали в соответствии с погрешностью измерительного прибора, которая составляет $\pm 0,05$. Требуемая точность не превосходила

погрешности получения сигнала. Обучение нейронной сети происходило по алгоритму обратного распространения ошибки, который заключается в предсказании нейросетью определённого ответа и коррекции ошибок на каждом новом цикле обучения [14].

Первым этапом обучения являлась предобработка входных полей базы данных с обучающей выборкой. Дальнейшие действия нейросети сводились к расчётом синдромов (возбуждение синапсов) каждого из уровней (скрытых слоёв нейронной сети). Количество уравнений синдромов соответствовало количеству нейронов на каждом скрытом слое. При этом, на синдромах последующих слоёв преобразуются части уравнений синдромов из предыдущих слоёв. Количество конечных синдромов эквивалентно количеству нейронов на выходном слое нейронной сети.

Следующий этап обучения нейросети заключался в постобработке конечных синдромов, при завершении которого нейросеть выдавала готовый ответ. Если он не входил в допустимые параметры погрешности вывода данных, то пример считался решённым неправильно и нейросеть начинала новый цикл обучения. Далее в обучающую выборку вносились погрешности определения, которые составляли не более 2%, и полученные данные использовались для обучения нейросети. Цикличность обучения продолжалась до тех пор, пока средняя ошибка нейросети не достигала минимального значения, т.е. количество правильно решённых примеров составляло 100%.

Обучение нейронной сети можно представить в виде следующей схемы [17], изображённой на рисунке 2.

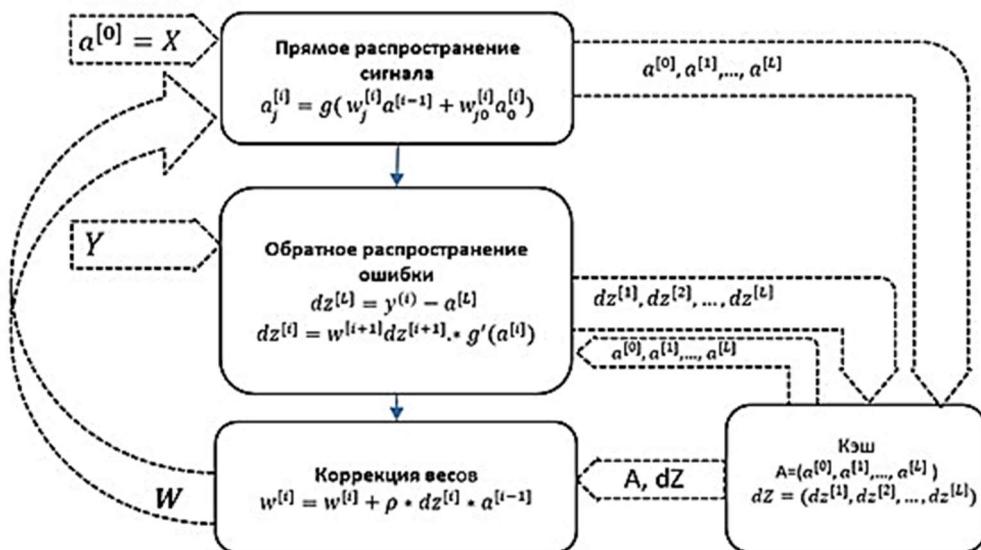


Рисунок 2 - Схема обучения нейронной сети с помощью алгоритма обратного распространения ошибок

Таким образом, для обучения нейронной сети использовали алгоритм обратного распространения ошибок с применением градиентов методов на основе полученной базы данных спектрофотометрического анализа.

Анализируя значимость входных сигналов полей, нами обнаружено, что наибольшее влияние оказывают входные данные соответствующие значениям оптической плотности анализируемых систем при длинах волн: 520 нм, 560 нм, 590 нм, 630 нм и 670 нм. Данные результаты можно связать с природой изучаемых систем и видом спектров их поглощения.

Для оценки производительности нейронной сети используют параметр, называемый условием Липшица [18], если удовлетворяет условию:

$$|\psi(x') - \psi(x'')| \leq L \|x' - x''\|, \quad x', x'' \in X,$$

где $L = L(\psi, X)$ есть константа Липшица ($0 < L < \infty$). Если функция «непрерывна по Липшицу», то изменение входных и выходных данных небольшое.

Рассчитанная константа Липшица для данной нейросети равна 25,47 при норме векторов выходных сигналов 0,1047.

Тестируирование корректности работы, обученной нейронной сети, проводили на тестовой выборке, состоящей из 50 тестовых спектров не входящих в обучающий массив данных. Тестовая выборка представляла из себя рабочие растворы аналитов, которые приготовлены из маточных растворов в день анализа. В качестве примера, на рисунке 3 приведено окно ответов нейронной сети на тестовую выборку.

№	P_1	Прогноз сети	Ошибка	P_2	Прогноз сети	Ошибка	P_3	Прогноз сети	Ошибка	P_4	Прогноз сети	Ошибка	P_5	Прогноз сети	Ошибка
1	0	0,01124339	-0,01124339	0,45	0,4505549	-0,0005549371	0,32	0,3572834	-0,03728338	0	-0,002166832	0,002166832	0,22	0,2433973	-0,02339728
2	0,54	0,4879946	0,05200545	0,45	0,4476219	0,002378148	0,32	0,3738896	-0,05388962	0,29	0,2816522	0,008347818	0,22	0,2340901	-0,0140906
3	0,54	0,5154762	0,02452377	0,45	0,4195734	0,03042657	0	0,05417678	-0,05417678	0,29	0,2356292	0,05437075	0	-0,0485311	0,0485311
4	0,54	0,4857544	0,05424563	0	0,04161156	-0,04161156	0,32	0,3174514	0,002538569	0,29	0,24956286	0,04037143	0,22	0,2740981	-0,05409813
5	0,54	0,5046124	0,03538755	0	0,0499895	-0,0499895	0	0,0462116	-0,0462116	0,29	0,2718542	0,01814581	0	-0,03805955	0,03805955
6	0	0,05500278	-0,05500278	0,45	0,4629076	-0,01290755	0,49	0,435688	0,05431198	0,54	0,5937071	-0,05370709	0,32	0,3328426	-0,01284256
7	0	-0,05526577	0,05526577	0,45	0,4998831	-0,04988309	0	0,0489022	-0,0489022	0	0,03130966	-0,03130966	0,32	0,3020976	0,01790244
8	0	-0,05491666	0,05491666	0	-0,05445335	0,05445335	0,49	0,4496144	0,04038562	0,54	0,4855844	0,05441556	0,32	0,3486058	-0,02860575
9	0,29	0,2353072	0,054693283	0,45	0,3965214	0,05337856	0,49	0,5145206	-0,02452059	0,54	0,5795037	-0,03950372	0,32	0,3259625	-0,005962544
10	0,29	0,2399342	0,05006582	0	0,05358126	-0,05358126	0	-0,05463063	0,05463063	0,54	0,4858447	0,0541553	0	-0,03284376	0,03284376
11	0	-0,0112269	0,0112269	0	-0,02159021	0,02159021	0	-0,03542158	0,03542158	0,49	0,5450491	-0,050504907	0	0,01075829	-0,01075829
12	0,22	0,2146739	0,005326079	0,29	0,235327	0,05467299	0,45	0,4666505	-0,01666049	0	0,04767257	-0,04767257	0	-0,03773321	0,03773321
13	0,22	0,2725988	-0,05259883	0,29	0,3090925	-0,01909252	0,45	0,4585237	-0,00852372	0,49	0,4903877	-0,000387708	0,54	0,5131772	0,02682284
14	0,22	0,2727138	-0,05213797	0,29	0,3172583	-0,02725833	0	-0,05406697	0,05406697	0	-0,001750517	0,001750517	0,54	0,4853064	0,05469359
15	0,22	0,1643502	0,05564985	0,29	0,2882844	0,001715609	0,45	0,462381	-0,01238103	0,49	0,4345002	0,05549981	0,54	0,5232717	0,01672832
16	0	-0,04764977	0,04764977	0,22	0,251235	-0,03123501	0,54	0,4885366	0,0514634	0	-0,04403987	0,04403987	0	-0,04992396	0,04992396
17	0	0,02320697	-0,02320697	0,22	0,2510626	-0,03106257	0,54	0,5699359	-0,02993586	0,32	0,3748267	-0,05482673	0,29	0,3446797	-0,05467965
18	0	-0,0002254844	0,0002254844	0	-0,03234526	0,03234526	0	-0,01064858	0,01064858	0,32	0,3677931	-0,04779305	0,29	0,2629258	-0,0270742
19	0,49	0,4417405	0,04825594	0,22	0,1655495	0,05445048	0,54	0,580027	-0,04002659	0,32	0,3718515	-0,05185153	0	0,04235065	-0,04235065
20	0,49	0,4494309	0,04056912	0,22	0,2136654	0,00633456	0,54	0,5695066	-0,02950659	0,32	0,3752234	-0,05522337	0,29	0,2899325	6,751061E-5
21	0	0,01252191	-0,01252191	0	0,0549197	-0,0549197	0	0,05510175	-0,05510175	0	-0,01702859	0,01702859	0,22	0,2634054	-0,04340538
22	0	-0,0117837	0,0117837	0	-0,02986862	0,02986862	0	0,0554318	-0,0554318	0,52	0,5014595	0,01854052	0,22	0,1666835	0,05331653
23	0	0,0499339	-0,0499339	0	-0,05388122	0,05388122	0,42	0,4039699	0,01603009	0,52	0,4654191	0,05458092	0,22	0,2126089	0,007391082

Рисунок 3 – Окно ответов нейронной сети при обучении на тестовой выборке

Для оценки правильности интерпретации результатов нейронной сети проводился расчёт погрешности определения (таблица 1).

Таблица 1 - Результат статистической обработки правильно вычисленных результатов определения красителей.

Краситель		Заданная концентрация, мг/л	Погрешность определения (s_r)
E129		5,3	0,167
		2,3	0,148
		3,9	0,124
		5,3	0,018
		4,4	0,049
E110		2,6	0,094
		4,4	0,046
		5,7	0,038
		5,3	0,106
E122		4,4	0,056
		2,3	0,196
		2,6	0,174
E133		5,7	0,105
		2,3	0,207
		2,6	0,248
		3,9	0,026
E155		3,9	0,020
		4,4	0,074
E 102		2,3	0,381

Оценка адекватности полученных предсказаний нейронной сети проводили по следующим параметрам: «количественное определение» - если s_r не превышает 0,18; «определение на качественном уровне» - s_r находится в интервале 0,18-0,50; «неверное определение» - если s_r превышает 0,5. Выбор данных критериев связан с величиной ошибки (s_r) в методиках, рекомендованных для определения анализов данной природы.

Анализ результатов определения красителей в тестовой выборке показывает, что неверно определены красители в 15,8% всех случаев, а верный количественно или качественно результат предсказания наблюдается в 84,2%.

Выводы. Таким образом, в ходе работы определены спектры поглощения некоторых пищевых красителей (E102, E110, E122, E129, E133, E155), представляющих опасность для здоровья человека и широко применяемых в промышленности. Поскольку в многокомпонентных смесях их спектры перекрываются, традиционный спектрофотометрический анализ не применим. В качестве решения проблемы одновременного определения красителей в одной пробе предложена методика на основе интерпретации аналитического сигнала спектрофотометрического определения с помощью искусственных нейронных сетей. С использованием платформы NeuroPro 0.25 разработана нейросеть и обучена на выборке, включающей спектры поглощения ~500 модельных водных растворов с общим числом реперных точек ~5500. Обучение сети позволило выявить значимость входных параметров и продемонстрировало возможность количественного и качественного анализа смесей красителей. Точность разработанной модели на тестовой выборке составила 84,2% всех проб.

Полученные данные представляют интерес при автоматизации работы роботизированных систем [19-20], связанных с необходимостью принятия решений в зависимости от химического состава окружающей среды, содержащей пищевые красители.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Timofeev A.V. Intelligent Control Applied to Non-Linear Systems and Neural Networks with Adaptive Architecture. *Journal of Intelligent Control, Neurocomputing and Fuzzy Logic*. 1996. V.1. № 1. P.1-18.
2. Тимофеев А.В. Мультиагентные системы и нейросетевые технологии в робототехнике и информатике. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2011. №1-1. С. 249-252.
3. Green N., Naik S., Campbell J. *Neural Networks in Robotics: Application of a Recurrent Neural Network to Robot State Estimation* // *Computer Science, Engineering*. 2019.
4. Оскотская Э.Р., Грибанов Е.Н., Басаргин Н.Н. Прогнозирование физико-химических свойств полимерных сорбентов с использованием искусственных нейронных сетей // *Материалы докладов съезда аналитиков России «Аналитическая химия – новые методы и возможности»*. Москва-Клязьма. 2010. С.212-213.
5. Грибанов Е.Н., Юшкова Э.Ю., Родичев А.Ю., Ананько А.С., Родичева И.В. Автоматизация химического контроля вод, содержащих органические токсиканты, для роботизированных систем // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2024. № 6 (368). С.95 – 100.
6. Boiko D. A., Kozlov K. S., Burykina J. V., Ilyushenkova V. V., Ananikov V. P., J. Am. Chem. Soc. 2022. V. 144. 14590.
7. Durmaz A. R., Müller M., Lei B. and etc. *Nat. Commun.* 2021. V. 12. 6272.
8. Mehdi Jalali-Heravi. *Neural Networks in Analytical Chemistry. Artificial Neural Networks*. 2009. V. 458.
9. Определение синтетических красителей E102, E110, E124, E131 в йогурте методом твердофазной спектрофотометрии / А. А. Дудкина, Н. В. Саранчина, Т. Н. Волгина [и др.] // Аналитика и контроль. – 2020. – Т. 24, № 1. – С. 48-55. – DOI 10.15826/analitika.2020.24.1.002.
10. Altinöz S. Simultaneous determination of Indigo and Ponceau-4R in food samples by using Vierordt's method, ratio spectra first order derivative and derivative UV spectrophotometry / Altinöz S., Toptan S. // *Journal of Food Composition and Analysis* – 2003. – Т. 16 – № 4 – С.517-530.
11. Llamas, N. E. Second order advantage in the determination of amaranth, sunset yellow FCF and tartrazine by UV-vis and multivariate curve resolution-alternating least squares / N. E. Llamas, M. Garrido, M. S. Di Nezio, B. S. Fernández Band // *Anal. Chim. Acta*. – 2009. – Vol. 655. – pp. 38–42.
12. Хамзина Е. И. Пищевые красители: польза и вред / Е. И. Хамзина, Н. Ю. Стожко // Экологическая безопасность в техносферном пространстве : сборник материалов Пятой Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов, Екатеринбург, 20 мая 2022 года. – Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2022. С. 317-320.

13. Нейромедиатор NEUROPRO 0.25 // STUDYLIB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/422181/nejroimitator-neuropro-0.25>
14. Горожанина Е.И. Нейронные сети: учебное пособие / Е.И. Горожанина. – Самара: ФГБОУ ВО ПГУТИ. 2017. С. 84.
15. Головко В.А. Нейросетевые технологии обработки данных: учеб. пособие / В. А. Головко, В. В. Краснопрошин. – Минск : БГУ, 2017. 263.
16. Мухамедиев Р.И., Амиргалиев Е.Н. Введение в машинное обучение: Учебник / Мухамедиев Р.И., Амиргалиев Е.Н. – Алматы: издание УМО РУМС, 2022. 252 с.
17. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: Перевод с английского / Н.Н. Куссуль, А.Ю. Шелестов; под общей ред. Н.Н. Куссуль. – 2-е издание. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1102 с.
18. Сергеев Я.Д., Квасов Д.Е. Краткое введение в теорию липшицевой глобальной оптимизации: Учебно-методическое пособие / Сергеев Я.Д., Квасов Д.Е. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2016. 48 с.
19. Савченко О.В., Куреннов Д.В. Система управления роботом на основе конечного автомата и нейронной сети // Вестник УГАТУ. 2014. Т.18, №5(66). С. 192-196.
20. Подольный В.А. Применение машинного обучения и нейросетей в химической промышленности //Международный научный журнал «Вестник науки». 2025. Т.5, №3(84). С.445-458.

Грибанов Евгений Николаевич

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
302026, Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95
к.х.н., доцент, зав. кафедрой химии
E-mail: gribanoven@gmail.com

Пугачев Аркадий Владимирович

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29
Студент
E-mail: gggwpwp11@gmail.com

Ананько Александр Станиславович

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
302026, Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95
студент
E-mail: twerp@inbox.ru

Васильев Кирилл Владимирович

Орловский государственный университет имени И.С.
Тургенева
302030, Россия, г. Орёл, ул. Московская, д.77
Студент
E-mail: gm.vasiljev485@gmail.com

GRIBANOV E.N., ANANKO A.S., PUGACHEV A.V., VASILIEV K.V.

MACHINE LEARNING IN THE AUTOMATION OF CHEMICAL ANALYSIS IN THE DETERMINATION OF DYES IN WATER SYSTEMS

Annotation: The paper shows the possibility of using artificial neural networks to determine the concentration of food dyes (E102, E110, E122, E129, E133 and E155) in model aquatic systems. For this purpose, a database was created that includes ~ 500 absorption spectra of multicomponent model aqueous solutions with different concentrations of detectable substances, the number of reference points for training the neural network was ~ 5,500. Based on this database, a neural network was trained, and the significance of each input parameter was determined. The possibility of analyzing an analytical signal using a neural network is shown when determining the analytes studied in the work, with their joint presence. The trained neural network demonstrated the possibility of quantitative and qualitative analysis of dye mixtures. The accuracy of the developed model in the test sample was 84.2% (correct determination of the concentration in the samples). The data obtained are of interest in automating the operation of robotic systems when it is necessary to make decisions depending on the chemical composition of the environment containing food dyes.

Keywords: neural network, chemical analysis, automation, robotic systems.

BIBLIOGRAPHY

1. Timofeev A.V. Intelligent Control Applied to Non-Linear Systems and Neural Networks with Adaptive Architecture. Journal of Intelligent Control, Neurocomputing and Fuzzy Logic. 1996. Vol. 1, No. 1, pp. 1–18.
2. Timofeev A.V. Multi-Agent Systems and Neural Network Technologies in Robotics and Computer Science. Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2011. No. 1–1, pp. 249–252.
3. Green N., Naik S., Campbell J. Neural Networks in Robotics: Application of a Recurrent Neural Network to Robot State Estimation // Computer Science, Engineering. 2019.
4. Oskotskaya E.R., Gribanov E.N., Basargin N.N. Prediction of physicochemical properties of polymer sorbents using artificial neural networks // Proceedings of the Congress of Analysts of Russia "Analytical Chemistry - New Methods and Possibilities". Moscow-Klyazma. 2010. Pp. 212-213.

5. Gribanov E.N., Yushkova E.Yu., Rodichev A.Yu., Ananko A.S., Rodicheva I.V. Automation of chemical control of water containing organic toxicants for robotic systems // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2024. No. 6 (368). Pp. 95 - 100.
6. Boiko D. A., Kozlov K. S., Burykina J. V., Ilyushenkova V. V., Ananikov V. P., J. Am. Chem. Soc. 2022. V. 144. 14590.
7. Durmaz A. R., Müller M., Lei B., et al. Nat. Commun. 2021. V. 12. 6272.
8. Mehdi Jalali-Heravi. Neural Networks in Analytical Chemistry. Artificial Neural Networks. 2009. V. 458.
9. Determination of synthetic dyes E102, E110, E124, E131 in yogurt by solid-phase spectrophotometry / A. A. Dudkina, N. V. Saranchina, T. N. Volgina [et al.] // Analytics and Control. - 2020. - Vol. 24, No. 1. - P. 48-55. – DOI 10.15826/analitika.2020.24.1.002.
10. Altinöz S. Simultaneous determination of Indigo and Ponceau-4R in food samples by using Vierordt's method, ratio spectra first order derivative and derivative UV spectrophotometry / Altinöz S., Toptan S. // Journal of Food Composition and Analysis - 2003. - T. 16 - No. 4 - P.517–530.
11. Llamas, N. E. Second order advantage in the determination of amaranth, sunset yellow FCF and tartrazine by UV-vis and multivariate curve resolution-alternating least squares / N. E. Llamas, M. Garrido, M. S. Di Nezio, B. S. Fernández Band // Anal. Chim. Acta. – 2009. – Vol. 655. – pp. 38–42.
12. Khamzina E. I. Food colors: benefits and harms / E. I. Khamzina, N. Yu. Stozhko // Environmental safety in the technosphere space: collection of materials of the Fifth International scientific and practical conference of teachers, young scientists and students, Ekaterinburg, May 20, 2022. – Ekaterinburg: Russian State Professional Pedagogical University, 2022. Pp. 317–320.
13. Neurotransmitter NEUROPRO 0.25 // STUDYLIB [Electronic resource]. – Access mode: <https://studylib.ru/doc/422181/neuroiminator-neuropro-0.25>
14. Gorozhanina E. I. Neural networks: a tutorial / E. I. Gorozhanina. – Samara: FGBOU VO PGUTI. 2017. P. 84.
15. Golovko V. A. Neural network technologies for data processing: textbook / V. A. Golovko, V. V. Krasnoproschin. – Minsk: BSU, 2017. 263.
16. Mukhamediyev R. I., Amirgaliev E. N. Introduction to machine learning: Textbook / Mukhamediyev R. I., Amirgaliev E. N. – Almaty: UMO RUMS publication, 2022. 252 p.
17. Khaikin S. Neural networks: a complete course: Translation from English / N. N. Kussul, A. Yu. Shelestov; under the general editorship of N. N. Kussul. – 2nd edition. – M.: Williams Publishing House, 2006. 1102 p.
18. Sergeev Ya.D., Kvasov D.E. Brief Introduction to the Theory of Lipschitz Global Optimization: Textbook / Sergeev Ya.D., Kvasov D.E. - Nizhny Novgorod: Publishing House of UNN, 2016. 48 p.
19. Savchenko O.V., Kurennov D.V. Robot Control System Based on a Finite State Automaton and a Neural Network // Bulletin of Ufa State Agrarian University. 2014. Vol. 18, No. 5 (66). Pp. 192-196.
20. Podolny V.A. Application of Machine Learning and Neural Networks in the Chemical Industry /// International Scientific Journal "Bulletin of Science". 2025. Vol. 5, No. 3 (84). Pp. 445-458.

Gribanov Evgeny Nikolaevich

Oryol State University
302026, Russia, Oryol, st. Komsomolskaya, 95
Candidate of Chemical Sciences, associate professor,
head of the department of Chemistry
E-mail: gribanoven@gmail.com

Ananko Aleksandr Stanislavovich

Oryol State University
Address: 302026, Russia, Oryol, st. Komsomolskaya, 95
Student
E-mail: twerp@inbox.ru

Pugachev Arkadiy Vladimirovich

Orel State University,
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Student
E-mail gggwpwp11@gmail.com

Vasiliev Kirill Vladimirovich,

Orel State University
Adress: 302026, Russia, Orel, Moskovskaya str., 77
Student
E-mail: gm.vasiljev485@gmail.com

© Грибанов Е.Н., Ананько А.С., Пугачёв А.В., Васильев К.В., 2025

КОЗЫРЕВ Д.Л., ЧЕРНЫШЕВ В.И., ПОЛЯКОВ Р.Н., ГОРИН А.В.

ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ФРИКЦИОННЫХ ДЕМПФЕРОВ В ТРАНСПОРТНЫХ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. В статье рассматривается потенциал применения управляемого демпфера сухого трения при проектировании транспортных виброзащитных систем. Предложены конструктивные решения, а также а рассмотрен оптимальный закон демпфирования. Приведенные выводы подкреплены результатами математического моделирования.

Ключевые слова: управляемый демпфер, сухое трение, динамический гаситель, алгоритм демпфирования, релейно-прерывистое демпфирование, математическое моделирование.

Введение

Проблема защиты оборудования и грузов от вибраций при транспортировке является одной из ключевых задач современной инженерии. Также в процессе эксплуатации оказывается негативное физиологическое воздействие на водителя и пассажиров [1]. Механизмы виброзащиты должны обеспечивать минимизацию динамических нагрузок, возникающих вследствие движения транспортного средства по неровностям дороги или рельсовому пути. Традиционные методы борьбы с вибрациями включают использование пружинных амортизаторов, гидравлических демпферов и других устройств, основанных на упругости материалов и вязкости жидкостей. Однако эти системы имеют ряд недостатков, таких как сложность конструкции, высокая стоимость обслуживания и ограниченная эффективность при небольших частотах колебаний, невозможность достаточно быстро адаптирования к изменяющимся внешним факторам [1, 2].

Основная часть

Задача по разработке и внедрению виброзащитных систем, позволяющих ограничить динамические воздействия в широком диапазоне частот на перевозимые грузы и водителя, остается актуальной для транспортного машиностроения [3]. Виброзащиту в широком диапазоне частот могут обеспечить только виброзащитные системы с управляемым инерционным гасителем за счет формирования оптимальных компенсационных воздействий [4].

Принципиальная расчетная схема виброзащитной системы с управляемым фрикционным демпфером, который установлен между динамическим гасителем и подвижным основанием, представлена на рисунке 1. Здесь динамический гаситель представляет собой инерционный элемент, закрепляемый на защищаемом объекте посредством упругого элемента [4].

Выбор использовать фрикционный демпфер связан с тем, что, во-первых, он позволяет реализовать релейные управляемые компенсационные воздействия [4, 5], а во-вторых, процесс управления таким демпфером, организованный на основе применения электромагнитных приводов, позволяет обеспечить необходимое быстродействие [5].

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

m – масса защищаемого объекта;

m_1 – масса динамического гасителя;

c, c_1 – коэффициенты жесткости несущего и упругого элемента динамического гасителя;

x, y, z – перемещения защищаемого объекта, подвижного основания и динамического гасителя;

$P_{\text{tp}}(t)$ – управляемая сила трения.

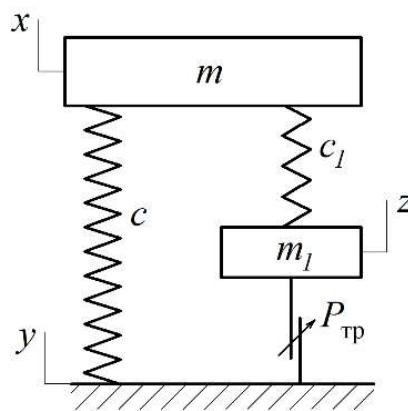


Рисунок 1 – Принципиальная расчетная схема виброзащитной системы с управляемым динамическим гасителем

Руководствуясь принципом Даламбера для принципиальной схемы возможно составить следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c(x - y) + c_1(x - z) + b_1(\dot{x} - \dot{z}) = 0; \\ m_1\ddot{z} + c_1(z - x) + P_{tp}(t) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

На рисунке 2 предложена схема виброзащитной системы, которая является возможной реализацией принципиальной расчетной схемы на рисунке 1. Виброзащитная система содержит основания 1 и 2, закрепленные на основании 2 стойки 3 и 4, зубчатые колеса 5 и 6, закрепленные на стойках 3 и 4 с возможностью свободного вращения, упругие элементы 7 и 8 ограничивающие поворот зубчатых колес относительно стоек, зубчатую рейку 9, входящую в зацепление с зубчатыми колесами, стержень 10, конец которого соединен с зубчатой рейкой, фрикционный демпфер 11, закрепленный на основании 1 и предназначенный для периодического торможения стержня 10 относительно основания 1, датчики скорости 12 и 13 установленные на основаниях 1 и 2, и блок управления 14.

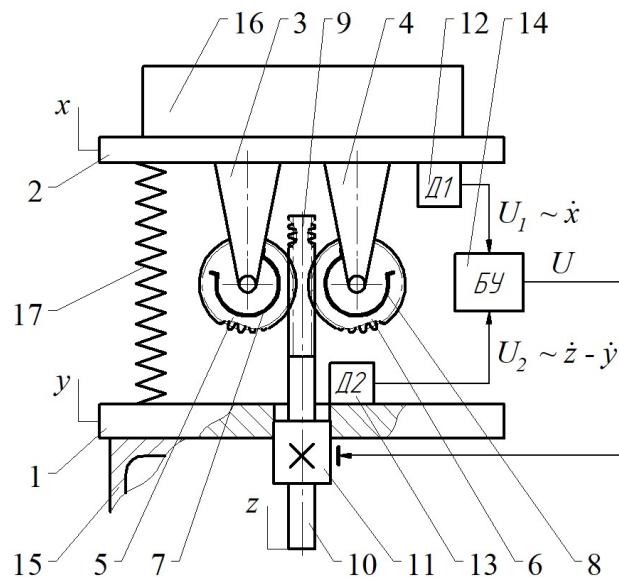


Рисунок 2 – Схема виброзащитной системы

Датчики скорости подключены к первому и второму входу блока управления, а фрикционный демпфер электрически связан с выходом блока управления. Основание 1 закреплено на источнике вибрации 15, а основание 2 связано с объектом защиты 16, между которыми установлен несущий упругий элемент 17.

Фрикционный демпфер 11 выполнен виде двух соосно закреплённых на основании 1 электромагнитов, сердечники которых при контакте со стержнем 10 создают силу трения и, соответственно, тормозят перемещение стержня 10 относительно основания 1.

Отметим, что предложенное конструктивное решение реализации принципиальной расчетной схемы имеет следующие преимущества [3, 5]:

- использование в качестве инерционного элемента зубчатых колес и рейки позволяет значительно уменьшить габариты и массу вибразащитной системы, так как вращающиеся элементы увеличивают инерционность за счет момента инерции;

- возможна регулировка в широком диапазоне инерционных характеристик динамического гасителя путем установки дополнительных масс на вращающиеся элементы.

Оптимальное компенсационное воздействие формируется следующим образом [6]. Датчик 12 генерирует электрический сигнал U_1 , пропорциональный скорости \dot{x} основания 2, а датчик 13 генерирует сигнал U_2 , пропорциональный относительной разности скоростей $\dot{z} - \dot{y}$ то есть скорости стержня 10 относительно основания 1. Данные сигналы соответственно поступают на первый и второй вход блока управления 14, где на основании их формируется управляющий сигналы:

$$U = \begin{cases} U_0, & U_1 \cdot U_2 > 0; \\ 0, & U_1 \cdot U_2 \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь U_0 – постоянный сигнал.

Управляющий сигнал U с выхода блока управления 14 подаётся на фрикционный демпфер 11.

В процессе колебаний динамического гасителя датчики 12 и 13 непрерывно генерируют электрические сигналы U_1 и U_2 , которые пропорциональны соответственно скорости \dot{x} основания 2 и относительной скорости $\dot{z} - \dot{y}$, то есть скорости стержня 10 относительно основания 1. Данные сигналы поступают в блок управления 14, где на основании их формируется управляющий сигнал U .

Скорость \dot{x} может совпадать или не совпадать по направлению с относительной скоростью $\dot{z} - \dot{y}$. В случае, когда эти скорости совпадают по направлению, то на выходе блока управления 14 формируется постоянный управляющий сигнал $U = U_0$. Если же эти скорости не совпадают по направлению, то управляющий сигнал $U = 0$. Под воздействием управляющего сигнала фрикционный демпфер включается в работу, а при значении $U = 0$ соответственно выключается из работы.

При кинематическом возмущении колебания основания 1 опережают по фазе колебания основания 2, поэтому фрикционный демпфер включается в работу при смене знака относительной скорости $\dot{z} - \dot{y}$ и выключается из работы при смене знака скорости \dot{x} .

Если фрикционный демпфер 11 включается в работу, то развиваемая при этом сила трения по цепочке стержень 10, зубчатая рейка 9, упругие элементы 7 и 8, зубчатые колёса 5 и 6, стойки 3 и 4 передаётся на основания 2 и определяет компенсационное воздействие, которое всегда направлено против движения основания 2, то есть уменьшает её скорость и, соответственно, скорость защищаемого объекта 16. Причём поворот зубчатых колес 5 и 6 относительно стоек 3 и 4 сопровождается закручиванием упругих элементов 7 и 8.

Если фрикционный демпфер 11 выключается из работы, то стойка 10, зубчатая рейка 9 и зубчатые колёса 5 и 6, как «упруго-присоединённая масса» динамического гасителя, движутся совместно под воздействием упругих элементов 7 и 8 относительно основания 2. При этом упругие элементы 7 и 8 раскручиваются и обеспечивают противофазное движение «упруго-присоединённой массы» и основания 2, то есть создают соответствующее компенсационное воздействие, которое направлено против движения основания 2. Так, если скорость \dot{x} направлена «вверх» или «вниз» после смены её знака (после выключения из работы фрикционного демпфера 11), то компенсационное воздействие будет направлено соответственно «вниз» или «вверх», то есть будет уменьшать скорость основания 2 и, соответственно, скорость защищаемого объекта 16.

Наличие второй стойкой 4, которая закреплена на основании 2, второго зубчатого колеса 6, которое закреплено на второй стойке 4 с возможностью свободного вращения,

второго упругого элемента 8, ограничивающего поворот второго зубчатого колеса 8 относительно второй стойки 4, двух датчиков 12 и 13, установленных на основаниях 1 и 2, и блока управления 14 позволяет реализовать управляемый процесс формирования компенсационных воздействий, которые всегда будут направлены против движения основания 2 и защищаемого объекта 16, уменьшая тем самым их скорость. Достигается это посредством работы фрикционного демпфера 11 в режиме «включить-выключить»: при включённом в работу фрикционном демпфере 11 сила трения, как компенсационное воздействие, будет всегда направлено против движения основания 2, уменьшая тем самым её скорость; аналогично, при выключенном из работы фрикционном демпфере 11 движение стойки 10, зубчатой рейки 9 и зубчатых колес 5 и 6, как «упруго-присоединённой массы», и второго основания происходит в противофазе, и, соответственно, упругие элементы 7 и 8 создают компенсационное воздействие, которое также направлено против движения основания 2.

Рассматриваемая виброзащитная система (рисунок 2) также как и принципиальная расчетная схема (рисунок 1) имеет две степени свободы, то есть ее текущее состояние возможно однозначно описать двумя обобщенными – смещением верхнего основания x и смещением стержня z . Смещение нижнего основания y является возмущающим воздействием. При этом эти перемещения однозначно определяют угол поворота зубчатых колес:

$$\varphi = \frac{x - z}{r}, \quad (3)$$

где r – радиус зубчатых колес. А также при описании состояния виброзащитной системы необходимо учитывать значения следующих параметров:

m – масса защищаемого объекта;

m_1 – масса стержня;

c – коэффициенты жесткости несущего упругого элемента;

q – жесткость упругих элементов, ограничивающих поворот зубчатых колес;

J – момент инерции зубчатых колес.

Тогда систему дифференциальных уравнений (1) для рассматриваемой виброзащитной системы преобразуется к следующему виду:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + m_1\ddot{z} + cx = cy - P_{\text{tp}}(t); \\ \frac{J}{r^2}\ddot{x} - (\frac{J}{r^2} + m_1)\ddot{z} + \frac{q}{r^2}x - \frac{q}{r^2}z = P_{\text{tp}}(t). \end{cases} \quad (4)$$

Эффективность применения виброзащитной системы подтверждается математическим моделированием в среде MATLAB [7]. Результаты моделирования в виде графиков перемещений объекта защиты и стержня приведены на рисунке 3а.

Важным этапом исследования является поиск зависимости оптимального релейно-прерывистого управления от компонент вектора состояния и времени (кинематического возмущения), что позволит получить оптимальное управление. Данная цель была достигнута при анализе совмещенных графиков скорости объекта защиты, скорости стержня и графика включения в работу демпфера (рисунок 3б).

Заключение

В итоге после проведения серии численных экспериментов можно сделать вывод о том, что использование управляемых демпферов сухого трения в конструкции виброзащитных является перспективным решением для транспортного машиностроения. Эти устройства имеют ряд преимуществ по сравнению с гидравлическими амортизаторами:

- сила трения демпфера не зависит от текущего состояния, что упрощает построение системы управления демпфированием;
- при срабатывании демпфера отсутствуют переходные процессы, сила демпфирования остаётся постоянной, что повышает быстродействие и эффективность демпфирования;
- фрикционный демпфер нечувствителен к расположению в пространстве, что дает большую свободу в конструктивных решениях;

- быстродействие и относительная простота конструкции фрикционного демпфера упрощает проведение диагностических исследований.

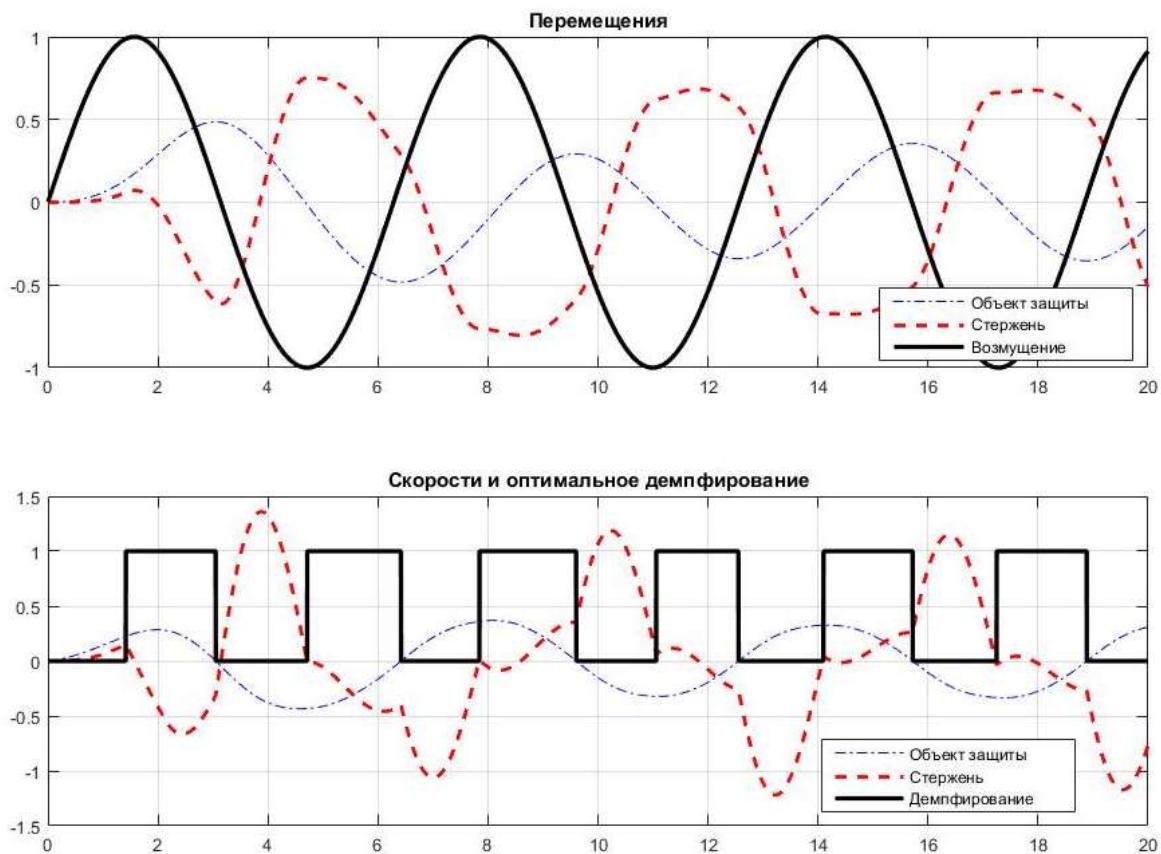


Рисунок 3 – Результаты моделирования

Также в результате моделирования отмечена устойчивая тенденция к получению оптимального управления в виде релейно-прерывистой функции, которая как сигнал, воздействующий на фрикционный демпфер, определяет его работу режиме «включить-выключить». Из анализа графиков колебаний защищаемого объекта следует, что при начальных условиях, имитирующих ударные воздействия, переходные процессы в системе затухают в пределах одного периода, что свидетельствует об уникальных противоударных свойствах исследуемой системы виброзащиты, реализующей совместный процесс динамического гашения колебаний и оптимального прерывистого демпфирования.

Работа выполнена в ОГУ им. И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-00196-24-08 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов от 23.08.2024 г., проект 1024041900021-8-2.3.1;2.2.3 Разработка конструкторских и программно-аппаратных решений управления вибрационными процессами в вертолётном транспорте, обеспечивающих формирование оптимальных компенсационных воздействий (FSGN-2024-0013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов, Г.А. Теория движения колесных машин/Г.А. Смирнов.– М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
2. Гусаров, В.И. Виброзащитные механизмы переменного демпфирования систем железнодорожного транспорта / В.И. Гусаров, А.В. Ковтунов, О.П. Мулюкин; под ред. О.П. Мулюкина. – Самара: СамГАСП, 2004. – 178 с.
3. Клинов, А.В. Динамика рычажной релаксационной подвески с прерывистым демпфированием: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / А.В. Клинов. – Орел, 2001. – 115 с.
4. Чернышев, В.И. Виброзащитная система с управляемым инерционным гасителем / В.И. Чернышев, Р.Н. Поляков, О.В. Фоминова // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24. № 1. С. 164-173.
5. Белозерова, Е.Б. Повышение эффективности виброзащиты виброактивного оборудования за счет прерывистого демпфирования: дис. канд. техн. наук: 01.02.06 / Е.Б. Белозерова. – Орел, 2012. – 184 с.
6. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

7. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК/С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

Козырев Дмитрий Леонидович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Учебный мастер Политехнического института имени
Н.Н. Поликарпова
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: kozyrev.dd@yandex.ru

Чернышев Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Профессор кафедры мехатроники, механики и
робототехники
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: chernyshev_46@mail.ru

Поляков Роман Николаевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Профессор кафедры мехатроники, механики и
робототехники
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: romanpolak@mail.ru

Горин Андрей Владимирович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Доцент кафедры мехатроники, механики и
робототехники
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: gorin57@mail.ru

KOZYREV D.L., CHERNSHEV V.I., POLYAKOV R.N., GORIN A.V.

APPLICATION OF CONTROLLED FRICTION DAMPERS IN TRANSPORT VIBRATION PROTECTION SYSTEMS

Abstract. This article examines the potential of using a controlled dry friction damper in the design of vehicle vibration protection systems. Design solutions are proposed, and an optimal damping law is examined. The findings are supported by mathematical modeling results.

Keywords: controlled damper, dry friction, dynamic damper, damping algorithm, relay-intermittent damping, mathematical modeling.

BIBLIOGRAPHY

1. Smirnov, G.A. Theory of Motion of Wheeled Machines/G.A. Smirnov. – Moscow: Mashinostroenie, 1990. – 352 p.
2. Gusarov, V.I. Vibration Protection Mechanisms of Variable Damping of Railway Transport Systems/V.I. Gusarov, A.V. Kovtunov, O.P. Mulyukin; edited by O.P. Mulyukin. – Samara: SamGASP, 2004. – 178 p.
3. Klimov, A.V. Dynamics of Lever Relaxation Suspension with Intermittent Damping: Dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 01.02.06/A.V. Klimov. – Orel, 2001. – 115 p.
4. Chernyshev, V.I. Vibration protection system with a controlled inertial damper / V.I. Chernyshev, R.N. Polyakov, O.V. Fominova // Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering. 2025. Vol. 24. No. 1. pp. 164-173.
5. Belozerova, E.B. Improving the efficiency of vibration isolation of vibroactive equipment due to intermittent damping: Dis. Cand. Sciences: 01.02.06 / E.B. Belozerova. - Orel, 2012. - 184 p.
6. Fryden, J. Modern sensors. Handbook / J. Fryden. - Moscow: Tekhnosfera, 2005. - 592 p.
7. German-Gallikn, S.G. Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems on PC/S.G. German-Galikin. – St. Petersburg: KORONA-Vek, 2008. – 368 p.

Kozyrev Dmitry Leonidovich

Orel State University named after I.S. Turgenev
Training master of the Polytechnic Institute named after
N.N. Polikarpov
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: kozyrev.dd@yandex.ru

Vladimir Ivanovich Chernyshev

Orel State University named after I.S. Turgenev
Professor of the Department of Mechatronics, Mechanics
and Robotics
302020, Oryol, Naugorskoye Shosse, 29
Email: chernyshev_46@mail.ru

Roman Nikolaevich Polyakov

Orel State University named after I.S. Turgenev
Professor of the Department of Mechatronics, Mechanics
and Robotics
302020, Oryol, Naugorskoye Shosse, 29
Email: romanpolak@mail.ru

Gorin Andrey Vladimirovich

Orel State University named after I.S. Turgenev
Student
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: gorin57@mail.ru

БОНДАРЕНКО М.Э., ГОРИН А.В., ЯКОВЛЕНКО О.В.

КОНЦЕПЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗНОСА ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ

Аннотация. В статье представлен краткий анализ способов оценки коэффициента износа подшипников скольжения. Предложена концепция конструкции экспериментальной установки для оценки коэффициента износа подшипников скольжения. Представлена структурно-функциональная схема экспериментальной установки по исследованию коэффициента износа подшипника скольжения. Показаны результаты расчетов, нагрузочного устройства экспериментальной установки. Сформулированы выводы и рекомендации для дальнейших исследований предложенной конструкции мехатронного подшипника скольжения с механизмом адаптации к режимам работы

Ключевые слова: подшипник скольжения, коэффициент, трение, эксперимент, установка.

Введение

Подшипники скольжения являются критически важными элементами многих транспортных механизмов, включая двигатели внутреннего сгорания, турбины, насосы и тяжелое оборудование [1, 2]. Их надежность и долговечность напрямую влияют на эффективность и безотказность работы машин, что особенно актуально в условиях высоких нагрузок и скоростей. Современные промышленные требования диктуют снижение энергопотерь на трение, увеличение срока службы деталей и минимизацию затрат на обслуживание. Одной из ключевых характеристик, определяющих ресурс подшипников скольжения, является коэффициент износа, который отражает интенсивность потери материала в процессе трения [3, 4]. Однако точное прогнозирование износа затруднено из-за сложного взаимодействия факторов, таких как нагрузка, скорость скольжения, смазка, температура и свойства материалов [5, 6]. В связи с этим разработка механизмов для оценки коэффициента износа подшипников скольжения представляет собой значимую научно-техническую задачу.

Материалы и методы

Способность функционирования опорных узлов в машиностроении на переходных режимах, связанных с пуском - остановом агрегата и резком возрастании нагрузки является одной из серьезных проблем [7, 8]. Для эффективного использования подшипников жидкостного трения различного конструктивного исполнения необходимы рекомендации полученные на основе экспериментальных исследований.

Современные испытательные стенды для исследования износа подшипников скольжения достигли высокого уровня технологического развития, превратившись в сложные автоматизированные комплексы, способные не только точно измерять параметры трения и износа, но и моделировать разнообразные эксплуатационные условия. Эти установки отличаются высокой степенью автоматизации благодаря применению программируемых логических контроллеров (PLC) и специализированного программного обеспечения, которое обеспечивает точное управление нагрузкой, скоростью вращения, температурой и другими параметрами, а также осуществляет автоматизированный сбор и обработку данных [9, 10].

Важной особенностью современных стендов является их многофункциональность – они позволяют тестировать различные типы подшипников скольжения, включая радиальные, осевые и комбинированные, с возможностью гибкой настройки таких параметров, как величина нагрузки, частота вращения и тип смазочного материала [11]. Для обеспечения высокой точности измерений в конструкциях используются передовые датчики: тензометрические датчики для контроля усилий, лазерные интерферометры для оценки микродеформаций, термопары для мониторинга температурного режима и акустические эмиссионные датчики, позволяющие фиксировать микроразрушения в материале в режиме реального времени [12].

Перспективным направлением является цифровизация испытательных процессов и внедрение интеллектуальных систем анализа [13]. Современные стены все чаще оснащаются системами компьютерного зрения для автоматического контроля состояния поверхностей трения, а также системами машинного обучения для оптимизации режимов испытаний.

Теория

В результате анализа литературных источников и патентного поиска была определена структурно функциональная схема экспериментальной установки для оценки коэффициента износа подшипника скольжения. Схема экспериментальной установки для оценки коэффициента износа подшипника скольжения представлена на рисунке 1.

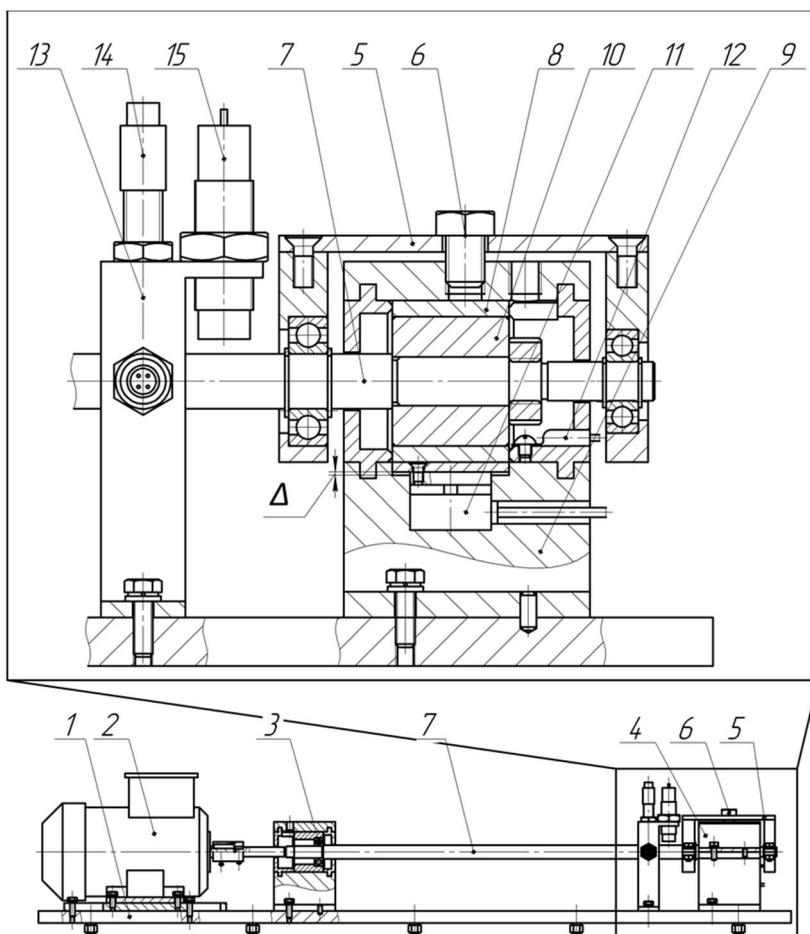


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для оценки коэффициента износа подшипника скольжения

Экспериментальная установка состоит из основания 1, на котором установлен электродвигатель 2, подшипниковая опора качения 3 и подшипниковая опора скольжения 4 с нагрузочным устройством 5, которое позволяет путем затяжки винта 6 через вал 7 создавать нагрузку на подшипник скольжения, и таким образом, исследовать его износ на различных режимах трения. Исследуемый подшипник скольжения представляет собой втулку 8, установленную в корпусе подшипниковой опоры 9, и цапфу 10, установленную на валу 7. Под втулкой 8 подшипника скольжения расположен датчик силы 11, который фиксирует текущую радиальную нагрузку, действующую на подшипник скольжения. Кроме того, в корпусе подшипниковой опоры 9 установлен датчик температуры 12 для измерения температуры смазочного материала. Вне корпуса на основании 1 установлена стойка 13 с парой взаимоперпендикулярно расположенных датчиков перемещения 14 для отслеживания относительной вибрации ротора и построения траекторий ротора, и датчик частоты вращения 15 для контроля текущей скорости вращения вала 7 экспериментальной установки. В процессе работы данные с датчиков собираются модулем сбора данных (на рисунке не указан), для фиксации текущих значений и их обработки.

Для обеспечения достоверности экспериментальных данных необходимо корректно подобрать измерительные приборы и систему сбора данных, учитывая их технические характеристики, точность, диапазон измерений и совместимость с другими компонентами установки. Выбор элементной базы основывается на требованиях к точности измерений, условиям эксплуатации (температурный диапазон, вибрации, механические нагрузки), а также

на возможности интеграции с системой обработки данных. Результатом подбора стал комплект оборудования, обеспечивающий надежную и информативную диагностику состояния подшипника скольжения в различных режимах трения [14, 15].

Обоснование выбора каждого датчика и платформы сбора данных проводился на основе анализа технических характеристик, стоимости и доступности компонентов, а также их соответствия задачам исследования. На основе выбранных выше компонентов была сформирована структурно-функциональная схема экспериментальной установки по исследованию коэффициента износа подшипника скольжения, которая изображена на рисунке 2.

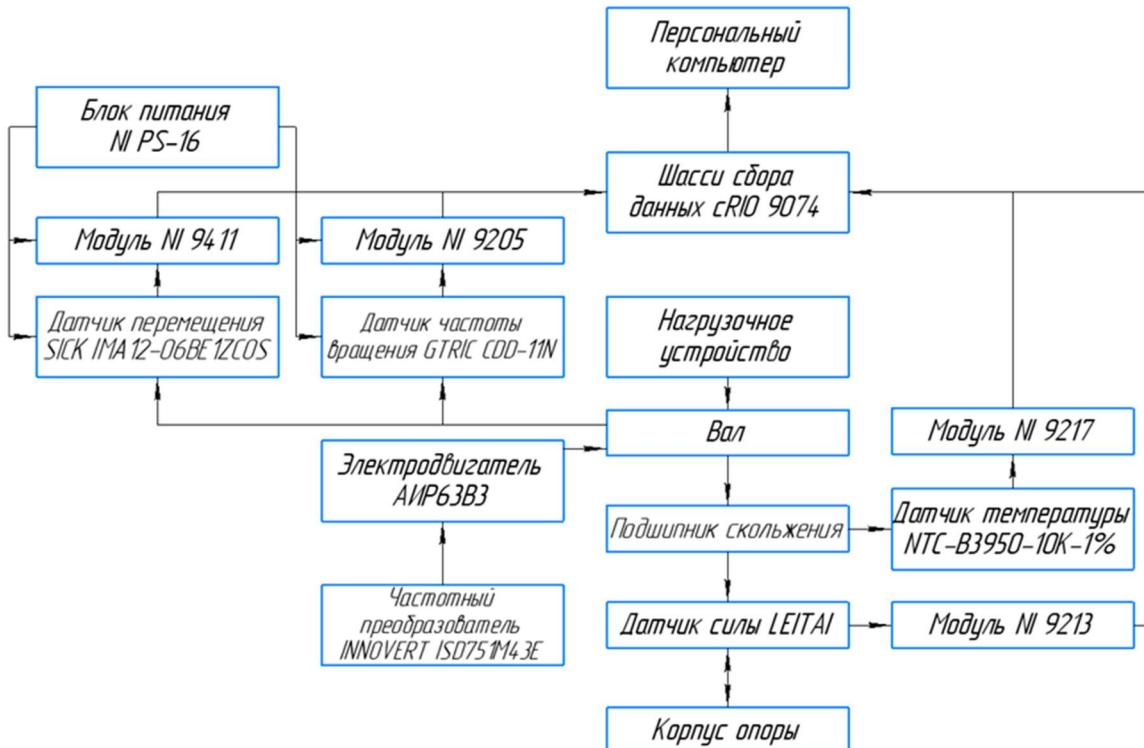


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема экспериментальной установки по исследованию коэффициента износа подшипника скольжения

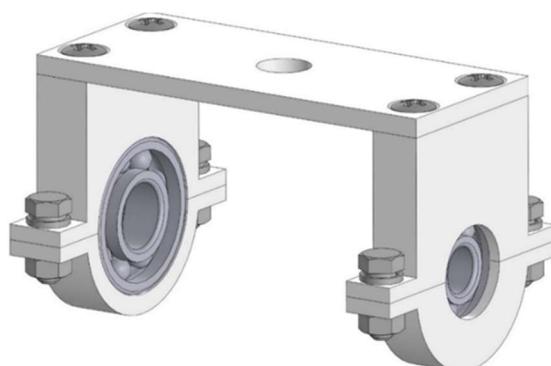


Рисунок 3 – Нагрузочное устройство экспериментальной установки для оценки коэффициента износа подшипников скольжения

Информационно-измерительная система базируется на комплектующих фирмы National Instruments и программном продукте Labview. Ниже приводятся описание назначения и характеристики основных составляющих ИИС.

Структурно-функциональная схема установки построена вокруг шасси сбора данных NI cRIO-9074, выполняющего роль центра обработки информации. К шасси подключены: модуль NI 9213 для измерения усилия на подшипник через тензометрический датчик силы LEITAI, модуль NI 9217 для контроля температуры в зоне контакта с помощью термистора NTC-B3950-10K-1%, модуль NI 9205 для регистрации относительной вибраций с помощью двух датчиков SICK IMA12-06BE1ZC0S и модуль NI 9411 для измерения частоты вращения

вала с помощью датчика частоты вращения GTRIC CDD-11N. Такая конфигурация позволяет синхронно фиксировать все параметры работы подшипника при различных режимах нагружения и частотах вращения. Частотный преобразователь INNOVERT ISD751M43E регулирует скорость вращения асинхронного электродвигателя АИР63В3, создавая необходимый режим трения в подшипниковом узле.

Для расчёта нагрузочного устройства (рисунок 3) экспериментальной установки для оценки коэффициента износа подшипников скольжения проведем расчёт крышки нагрузочного устройства в программе APM FEM.

Результаты и обсуждение

Результаты расчёта методом конечных элементов пластины толщиной 3 мм показали, что коэффициент запаса по пределу текучести составляет менее единицы, что свидетельствует о недостаточной прочности конструкции при заданных нагрузках. Это указывает на возможность возникновения пластических деформаций или разрушения в наиболее нагруженных зонах. Для обеспечения работоспособности конструкции необходимо увеличить толщину пластины. Увеличим толщину пластины до 5 мм и повторно проведем прочностной расчёт. На рисунках 4 и 5 представлены карты перемещений и карты коэффициента запаса по пределу текучести для крышки нагрузочного устройства толщиной 5 мм.

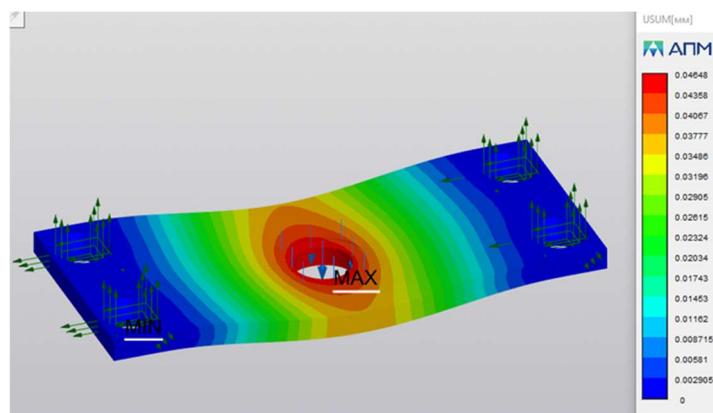


Рисунок 4 – Карта перемещений крышки нагрузочного устройства

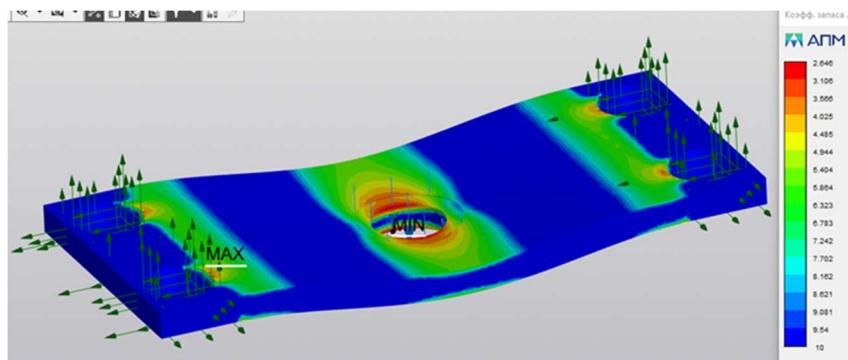


Рисунок 5 – Карта коэффициента запаса по пределу текучести крышки нагрузочного устройства толщиной 5 мм

После увеличения толщины пластины до 5 мм расчёт методом конечных элементов показал, что коэффициент запаса по пределу текучести возрос до 2,6, что соответствует общепринятым нормам для большинства инженерных конструкций. Полученное значение подтверждает, что модифицированная конструкция обладает достаточной прочностью и устойчивостью к пластическим деформациям при эксплуатационных нагрузках. Некоторый запас прочности делает возможным увеличение нагрузки на подшипниковый узел для проведения более широкого спектра исследований износа подшипника скольжения.

Технический результат заключается в информативности состояния подшипника скольжения в течение проведения экспериментальных исследований, что приводит к получению точных сведений о режиме трения и дальнейшего более точного расчёта коэффициента износа различных материалов подшипника скольжения.

Выводы

Результаты анализа экспериментальных данных позволяют сделать вывод о возможности применения установки для сравнительного анализа материалов, смазочных сред и рабочих условий, что способствует уточнению коэффициентов износа. Установка позволяет моделировать различные режимы трения, включая граничный и жидкостный, что обеспечивает достоверность результатов испытаний.

В дальнейшем возможно усовершенствование установки за счёт внедрения дополнительных датчиков, расширения диапазона нагрузок и скоростей, а также интеграции систем машинного обучения для автоматизации анализа данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артеменко, Н. П. Газожидкостные опоры роторов криогенных турбонасосных агрегатов [Текст] / Н. П. Артеменко [и др.] – М. : КБ Химмаш, 1993. – 146 с.
2. Давыдов, А. Б. Расчет и конструирование турбодетандеров [Текст] / А. Б. Давыдов, А. Ш. Кобулашвили, А. Н. Шерстюк – М. Машиностроение, 1987. – 230 с.
3. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.
4. Майоров, С.В. Исследование динамики ассиметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 – С. 73-82.
5. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(355) – 2022. С.51 – 58.
6. R. Siva Srinivas, R. Tiwari, Ch. Kannababu Application of active magnetic bearings in flexible rotordynamic systems – A state-of-the-art review Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 106, June 2018, Pages 537-572.
7. Kai Feng, Han-Qing Guan, Zi-Long Zhao, Tian-Yu Liu *Active* bump-type foil bearing with controllable mechanical preloads Tribology International, Volume 120, April 2018, Pages 187-202.
8. Heshmat H, Shapiro W, Gray S. Development of foil journal bearings for high load capacity and high speed whirl stability. J Tribol 1982;104:149–56..
9. Jorge G. Salazar, Ilmar F. Santos Active tilting-pad journal bearings supporting flexible rotors: Part I – The hybrid lubricationTribology International, Volume 107, March 2017, Pages 94-105.
10. Athanasios Chasalevris, Fadi Dohnal Improving stability and operation of turbine rotors using adjustable journal bearings Tribology International, Volume 104, December 2016, Pages 369-382.
11. Jorge G. Salazar, Ilmar F. Santos *Active* tilting-pad journal *bearings* supporting flexible rotors: Part II–The model-based feedback-controlled lubrication Tribology International, Volume 107, March 2017, Pages 106-115.
12. Asger M. Haugaard, Ilmar F. Santos Multi-orifice *active* tilting-pad journal *bearings*-Harnessing of synergistic coupling effects Tribology International, Volume 43, Issue 8, August 2010, Pages 1374-1391.
13. Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н., Горин А.В. Исследование характеристик гибридного подшипника с газовой смазкой // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2020. – № 1(339). – С. 107–113.
14. Подольский, М. Е. Упорные подшипники скольжения: Теория и расчёт / М. Е. Подольский – Л. : Машиностроение, 1981. – 261с.
15. Бондаренко М.Э. Детали мехатронных модулей роботов и их конструирование. Комбинированные подшипники: учебное пособие. / М.Э. Бондаренко, А.В. Горин. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2025. – 82с.

Бондаренко Максим Эдуардович
Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева
Адрес: 302030, Россия, г. Орел,
Наугорское шоссе, 29
К.т.н., доцент, кафедры
мехатроники, механики и
робототехники
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

Горин Андрей Владимирович
Орловский государственный
университет имени И.С.
Тургенева
Адрес: 302030, Россия, г. Орел,
Наугорское шоссе, 29
К.т.н., доцент, кафедры
мехатроники, механики и
робототехники
E-mail: gorin57@mail.ru

**Яковленко Оксана
Владимировна**
Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева
Адрес: Россия, 302020, г. Орёл,
Наугорское шоссе, 29
Студент
E-mail: aksacha79@mail.ru

CONCEPT OF AN EXPERIMENTAL SETUPFOR ESTIMATION OF THE WEAR COEFFICIENT OF A PLAIN BEARING

Abstract. This article presents a brief analysis of methods for estimating the wear coefficient of plain bearings. A design concept for an experimental setup for estimating the wear coefficient of plain bearings is proposed. A structural and functional diagram of the experimental setup for studying the wear coefficient of plain bearings is presented. Calculation results and the experimental setup's loading device are shown. Conclusions and recommendations for further research on the proposed design of a mechatronic plain bearing with an adaptive mechanism for operating modes are formulated.

Keywords: plain bearing, coefficient, friction, experiment, installation.

BIBLIOGRAPHY

1. Artemenko, N. P. Gas-liquid bearings of rotors of cryogenic turbopump units [Text] / N. P. Artemenko [et al.] - M.: KB Khimmash, 1993. - 146 p.
2. Davydov, A. B. Calculation and design of turboexpanders [Text] / A. B. Davydov, A. Sh. Kobulashvili, A. N. Sherstyuk - M. Mechanical Engineering, 1987. - 230 p.
3. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of an active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: Orel State University named after I.S. Turgenev, No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.
4. Mayorov, S. V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S. V. Mayorov, M. E. Bondarenko, M. A. Tokmakova, V. A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: I. S. Turgenev State University – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.
5. Bondarenko, M. E. Combined bearing unit with variable stiffness and damping characteristics / M. E. Bondarenko, R. N. Polyakov, A. V. Gorin, V. A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. Orel: I. S. Turgenev No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.
6. R. Siva Srinivas, R. Tiwari, Ch. Kannababu Application of active magnetic bearings in flexible rotordynamic systems – A state-of-the-art review Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 106, June 2018, Pages 537-572.
7. Kai Feng, Han-Qing Guan, Zi-Long Zhao, Tian-Yu Liu Active bump-type foil bearing with controllable mechanical preloads Tribology International, Volume 120, April 2018, Pages 187-202.
8. Heshmat H, Shapiro W, Gray S. Development of foil journal bearings for high load capacity and high speed whirl stability. J Tribol 1982;104:149–56..
9. Jorge G. Salazar, Ilmar F. Santos Active tilting-pad journal bearings supporting flexible rotors: Part I – The hybrid lubricationTribology International, Volume 107, March 2017, Pages 94-105.
10. Athanasios Chasalevris, Fadi Dohnal Improving stability and operation of turbine rotors using adjustable journal bearings Tribology International, Volume 104, December 2016, Pages 369-382.
11. Jorge G. Salazar, Ilmar F. Santos Active tilting-pad journal bearings supporting flexible rotors: Part II–The model-based feedback-controlled lubrication Tribology International, Volume 107, March 2017, Pages 106-115.
12. Asger M. Haugaard, Ilmar F. Santos Multi-orifice active tilting-pad journal bearings-Harnessing of synergetic coupling effects Tribology International, Volume 43, Issue 8, August 2010, Pages 1374-1391.
13. Bondarenko M.E., Polyakov R.N., Gorin A.V. Study of the characteristics of a hybrid bearing with gas lubrication // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2020. - No. 1 (339). - P. 107-113.
14. Podolsky, M. E. Thrust plain bearings: Theory and calculation / M. E. Podolsky - L.: Mechanical Engineering, 1981. - 261 p.
15. Bondarenko M. E. Details of mechatronic modules of robots and their design. Combined bearings: a tutorial. / M. E. Bondarenko, A. V. Gorin. - Orel: OSU named after I. S. Turgenev, 2025. - 82 p.

Bondarenko Maxim Eduardovich

Orel State University

Adress: 302020, Russia, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Candidate of technical sciences

E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

Gorin Andrei Vladimirovich

Orel State University

Adress: 302020, Russia, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Candidate of technical sciences

E-mail: gorin57@mail.ru

Yakovlenko Oksana Vladimirovna

Orel State University

Adress: 302020, Russia, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Student

E-mail: aksacha79@mail.ru

ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 658.562.64

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-374-6-125-135

КУЗЬМЕНКО В.П.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЫТОВОГО СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ДИОДА

Аннотация. Для проектирования качественных светодиодных осветительных приборов, обеспечивающих необходимый уровень качества освещения без его заметного снижения и в течение продолжительного времени эксплуатации, необходимо учитывать множество параметров, среди которых ключевыми являются показатели световой эффективности, долговечности, цветопередачи, а также безопасности. При этом, в силу их высокой светоотдачи, продолжительному сроку службы, гибких возможностей управления световым потоком за счет применения широтно-импульсной модуляции в устройствах питания и значительно более компактных размерах, чем традиционные осветительные приборы, в виде ламп накаливания, люминесцентных и т.д., светодиодные осветительные приборы на текущий момент являются наиболее перспективными осветительными приборами для использования в бытовых условиях.

Целью настоящей работы является разработка модели позволяющей производить построение спектральных характеристик света бытовых светоизлучающих диодов в зависимости от параметров световой и цветовой эффективности, температуры *p-n*-перехода и меланопсической составляющей спектра. Для повышения физической точности модели включены температурные поправки *p-n*-перехода и учет межфазного переноса энергии между слоями люминофора. Модель протестирована на данных эталонного источника света EX4 CIE F4, представленных по стандарту ANSI/IES TM-30-20 с использованием уравнения фотометрической чувствительности, спектральной суперпозиции и стандартных функций сложения.

Результаты верификации модели показали ошибку воспроизведения спектральных характеристик менее 5% и что модель позволяет определить, какими должны быть оптимальные параметры спектрального состава света для достижения баланса между световой эффективностью, качеством цветопередачи и минимальным биологическим воздействием.

Проведённое исследование продемонстрировало эффективность предложенной модели для анализа и оптимизации спектральных характеристик бытовых светодиодов. Построенная модель позволяет учитывать широкий спектр параметров, включая вклад кристалла светодиода и люминофорных покрытий, их температурные зависимости, а также параметры цветопередачи и биологического воздействия света. Полученные результаты демонстрируют, что предложенная методика позволяет не только воспроизвести экспериментальные данные с высокой точностью, но и предложить пути улучшения показателей качества источников света.

Ключевые слова: управление качеством, бытовые светодиоды, спектральный анализ, эффективность светодиодов, модель спектрального анализа, качество освещения

Введение

Для проектирования качественных светодиодных осветительных приборов (СОП), обеспечивающих необходимый уровень качества освещения без его заметного снижения и в течение продолжительного времени эксплуатации, необходимо учитывать множество параметров, среди которых ключевыми являются показатели световой эффективности, долговечности, цветопередачи, а также безопасности.

Тем не менее, светоизлучающие диоды (СИД) по своей природе излучают квазимонохроматический свет, что значит, что для достижения необходимого уровня цветопередачи в СОП используются фотoluminesцентные коротковолновые светодиоды с люминофорными покрытиями, предназначенные для получения белого (или близкого к белому) света. Такие СИД обычно подразделяются по спектрам исходного излучения на синее (*B*) излучение в сочетании с двухкомпонентным красно-зеленым (*RG*) люминофором, синее (*B*) излучение в паре с желтым (*Y*) люминофором, или ультрафиолетовое (*УФ*) излучение в сочетании с трехкомпонентным (или более) красно-зелено-голубым (*RGB*) люминофором, также возможны кластерные сборки красных, зеленых и синих светодиодов (*RGB*-кластеры), в которых сочетаются светодиоды разных цветов для получения желаемого спектра белого

света. При этом каждый из описанных подходов получения белого или близкого к белому свету СИД имеет свой собственный набор проблем, связанных с энергоэффективностью, спектральной стабильностью и качеством цветопередачи. Среди недостатков каждой, из описанных технологий выступают проблемы, связанные со снижением энергоэффективности из-за потерь при преобразовании света, деградации люминофорных покрытий, что влияет на стабильность спектра света и качество цветопередачи, повышенное энергопотребление, сложности в поддержании цветового баланса при использовании *RGB*-кластеров и т.д. [1-3]. Таким образом, в контексте управления качеством освещения и проектирования СОП заданного показателя качества возникает задача моделирования спектральных характеристик различных конфигураций СИД для оптимизации и поддержании качества и стабильности света, цветопередачи и энергетической эффективности СОП.

Для оценки качества цвета света, излучаемого осветительным прибором, традиционно применяется индекс цветопередачи (*CRI*, от англ. – *colour rendering index*), однако современные исследования демонстрируют его недостаточную точность в контексте СИД, в результате чего возникла необходимость разработки новых методик для внедрения метрик точность цветопередачи (R_f) и насыщенности цвета (R_g), приведенных к нормативам для СОП в стандарте *ANSI/IES TM-30-20* [4-6].

Помимо этого, важным показателем качества осветительного прибора является воздействие излучаемого им света на циркадные ритмы человека. Исследования показывают, что избыточное содержание синего света в спектре СИД может вызывать нарушения сна и вызывать зрительное утомление у пользователей, что подчеркивает необходимость изучения возможности и целесообразности учета меланопического действия света (общепринятое сокращение: *m-DER*, от англ. – *melanopic daylight efficacy ratio*) при проектировании бытовых систем освещения, чтобы минимизировать негативное влияние на биологические процессы при сохранении высоких качественных характеристик света [7-10].

При этом, несмотря на обширные исследования, сосредоточенные на лабораторных испытаниях СОП, аспекты их длительного воздействия генерируемого спектра света с высокой интенсивностью в области синих и сине-голубых длин волн остаются недостаточно изученными в бытовых условиях. В частности, отсутствуют универсальные подходы к моделированию спектральных характеристик бытовых СИД, которые учитывали бы не только энергоэффективность и визуальное восприятие, но и биологическое воздействие. Актуальность данной задачи также подчеркивается в научных исследованиях последних лет, при этом акцентируется необходимость разработки моделей и подходов комплексной оценки основных параметров СОП [11, 12].

Целью настоящей работы является разработка модели позволяющей производить построение спектральных характеристик света бытовых СИД в зависимости от параметров световой и цветовой эффективности, температуры *p-n*-перехода и меланопической составляющей спектра.

Построение модели оценки спектральных характеристик бытового светоизлучающего диода в зависимости от энергетических параметров

В представленном разделе излагаются материалы и методы, обосновывающие построение модели оптимизации энергетических параметров СИД для обеспечения заданных спектральных характеристик излучаемого света, с учётом физических основ генерации излучения, фотолюминесцентного преобразования, а также с учетом требований к энергоэффективности и качеству цветопередачи, построенную на аппарате фотометрии и колориметрии (согласно ГОСТ Р 8.827-2013, рекомендациям международной комиссии по освещению (*CIE*, от англ. *International Commission on Illumination*) и зарубежному стандарту *ANSI/IES TM-30-20*) с дополнительными поправками, для учета вклада нескольких слоев люминофорных покрытий на чипе, температуры *p-n*-перехода, циркадного (меланопическое) воздействия.

В качестве основного допущения принято, что излучение кристалла светоизлучающего диода бытового СОП формируется комбинацией коротковолнового («синего» и «фиолетового») полупроводникового излучения и фотолюминесценции люминофорного

покрытия. Тогда в исходной модели будет рассматриваться длина волны λ в диапазоне от 380 до 780 нм (фотопический диапазон) и все интегралы по λ рассматриваются в данных пределах, что делает моделей более гибкой для вычислений и позволяет исключить влияние нелинейностей вне видимого диапазона света [13].

Чтобы описать распределение энергии в видимой части спектра света, вводится функция спектральной плотности энергии излучения $\phi_e(\lambda)$, которая показывает, какая энергетическая мощность приходится на единичный отрезок длины волны (1 нм) в интервале $\lambda \dots \lambda + d\lambda$ и представляет собой спектр СИД, возникающий как сумма излучений полупроводника и каждого из N слоев люминофорных каналов, можно представить уравнением (1):

$$\phi_e(\lambda) = \alpha \phi_{chip}(\lambda) + \sum_{i=1}^N \beta_i \phi_{ph,i}(\lambda), \quad (1)$$

где $\phi_{chip}(\lambda)$ – нормированная функция спектрального излучения кристалла светодиода, Вт/нм;

$\phi_{ph,i}(\lambda)$ – нормированная функция спектрального излучения i -го слоя люминофора, (Вт/нм);

α – коэффициент вклада спектра кристалла светодиода в результирующий спектр излучения, безразмерная величина;

β_i – коэффициент вклада спектра i -го слоя люминофора, определяющий вклад соответствующего спектрального канала в результирующий спектр излучения, безразмерная величина.

Для корректного учёта суммарной спектральной плотности энергии излучения α и β_i должны быть связаны с прямым током на кристалле светодиода и оптическим КПД, но в общем виде в уравнении (1) α и β_i считаются основными искомыми параметрами. Световая (фотометрическая) мощность рассчитывается с учетом фотопической спектральной чувствительности человеческого зрения $V(\lambda)$ и масштабного коэффициента зрительной эффективности $K_m \approx 683$ лм/Вт. Тогда общий световой поток определяется с помощью следующего уравнения (2):

$$\Phi_v = \int_{380}^{780} K_m \cdot V(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где Φ_v – общий световой поток СИД, лм;

K_m – коэффициент зрительной эффективности, $K_m \approx 683$ лм/Вт;

$V(\lambda)$ – фотопическая спектральная чувствительность зрения человека (безразмерная величина, согласно методике стандарта CIE 1924).

Здесь $\phi_e(\lambda)$ берётся из уравнения (1), а результат интегрирования даёт общее количество люмен, генерируемое СИД во всём фотопическом диапазоне.

Световая эффективность СИД определяется через электрическую мощность СИД (уравнение 3):

$$\eta = \frac{\Phi_v}{P_{in}} = \frac{1}{P_{in}} \int_{380}^{780} K_m \cdot V(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где P_{in} – потребляемая мощность СИД, Вт;

η – световая эффективность СИД, лм/Вт.

В бытовых СОП номинальное значение η может варьироваться от 60 – 70 лм/Вт для менее эффективных СИД и 100 – 150 лм/Вт и выше для высокоэффективных моделей.

Для вычисления координат цветности и показателей цветопередачи требуется колориметрическая система CIE 1931, согласно чему вводятся тристимулюсы X, Y, Z , которые получаются интегрированием произведения $\phi_e(\lambda)$ на функции сложения $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ (размерность каждого из этих функций – 1/нм, хотя они безразмерны по амплитуде, но интегрируются с энергетическим спектром. Для удобства при колориметрических расчётах обычно вводят нормировку, при которой Y принимается равным 1 или 100. Однако в общем виде уравнение для тристимулюсов (4) можно записать так:

$$\begin{aligned} X &= k \int_{380}^{780} x(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) d\lambda, \\ Y &= k \int_{380}^{780} y(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) d\lambda, \\ Z &= k \int_{380}^{780} z(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (4)$$

где k – нормирующий множитель, задаваемый исходя из выбранного масштаба, (1/Вт); если требуется, например, считать $Y = 100$ в так называемых «процентных» единицах, тогда:

$$k = \frac{100}{\int_{380}^{780} x(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) d\lambda}.$$

В результате X, Y, Z получаются безразмерными. Координаты цветности (x, y) в системе *CIE* 1931 представляют собой долю соответствующих тристимулюсов и вычисляются согласно общепринятой методике (5):

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z}, \\ y &= \frac{X}{X + Y + Z}. \end{aligned} \quad (5)$$

Чтобы получить коррелированную цветовую температуру (*CCT* от англ. *Change Color Temperature*), вводится промежуточная переменная n :

$$n = \frac{x - 0,3320}{y - 0,1858},$$

далее используется полиномиальная формула для определения *CCT*:

$$CCT(x, y) = -449n^3 + 3525n^2 - 6823,3n + 5520,33.$$

Сравнивая *CCT* исследуемого спектра с некоторым эталонным «чёрным телом» или дневным светом, можно понять, насколько выбранный СИД «тёплый» или «холодный».

Следующим важным звеном системы являются индексы цветопередачи. В классическом подходе (ГОСТ Р 8.827-2013 и *CIE*) вычисляется общий индекс цветопередачи *CRI* (R_a), представляющий собой среднее арифметическое восьмичастных индексов цветопередачи R_i . Расчёт осуществляется в несколько шагов. Сначала для каждого тест-объекта i , обладающего спектром отражения $\rho_i(\lambda)$, необходимо определить координаты цветности при освещении исследуемым спектром $\phi_e(\lambda)$ и при освещении эталонным $\phi_r(\lambda)$. Далее необходимо найти величину цветового сдвига ΔE_i (либо в равноконтрастном пространстве по методике *CIE* 1964, либо по методике *CIE* 1976 *LAB*), после чего оценивается частный индекс R_i по эмпирическому выражению (6):

$$R_i = 100 - 4,6\Delta E_i, \quad (6)$$

при $I = 1, \dots, 8$,

после чего общий индекс R_a выражается следующим выражением (7):

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (7)$$

Далее, чтобы учесть биологическое влияние на циркадные ритмы, в модель добавляется интегральный показатель меланопического действия P_{mel} (в относительных единицах), который вычисляется через весовую функцию $V_{mel}(\lambda)$, отражающую спектральную чувствительность меланопсин-содержащих ганглиозных клеток по уравнению (8):

$$P_{mel} = \int_{380}^{780} V_{mel}(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) d\lambda. \quad (8)$$

Если нужно сравнивать разные источники света между собой по степени циркадного воздействия, то P_{mel} можно нормировать на некий эталон в виде монохроматического стимула при $\lambda = 555$ нм, соответствующего бледному дневному свету. В любом случае, эта величина

зависит от коротковолновой части спектра $\phi_e(\lambda)$ и даёт оценку «сине-голубого» вклада в общий видимый спектр света СИД.

Для обеспечения большей практической новизны предлагаемого подхода в базовую формулу (1) вводится набор функций, отражающих рабочую температуру θ [14, 15]. Предполагается, что для каждой компоненты – чипа и люминофора – известен температурный множитель, корректирующий их спектральное излучение:

$$\phi_e(\lambda) = \alpha W_{chip}(\lambda) + \sum_{i=1}^N \beta_i \cdot \Gamma_i(\theta) \cdot \phi_{ph,i}(\lambda),$$

где $W_{chip}(\theta)$ – поправочный коэффициент для кристалла светодиода, учитывающий изменение квантового выхода при температуре θ , безразмерная величина;

$\Gamma_i(\theta)$ – температурный множитель, корректирующий спектральное излучение i -го люминофора в зависимости от температуры θ ; учитывает сдвиг спектра и снижение интенсивности излучения при изменении температуры.

$W_{chip}(\theta)$ и $\Gamma_i(\theta)$ определяются из спектральных замеров при разных θ . Выражения (2) – (8) сохраняют прежний вид, но в интегралах подставляются скорректированные функции $\phi_e(\lambda)$. Это помогает точнее прогнозировать световой поток, цветность, *CRI* и меланопические показатели при реальных условиях работы.

Для повышения точности подхода предлагается расширение учёта межфазного переноса энергии, для чего в выражение (1) вносится дополнительный член, отражающий реабсорбцию и повторное излучение, когда часть энергии от одного фосфора или чипа переходит к другому фосфору, для этого вводятся коэффициенты κ_{ij} , отвечающие за межфосфорное взаимодействие:

$$\phi_e(\lambda) = \alpha \phi_{chip}(\lambda) + \sum_{i=1}^N \beta_i \cdot \phi_{ph,i}(\lambda) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \kappa_{ij} \beta_j F_{i,j}(\lambda),$$

где $F_{ij}(\lambda)$ – функция спектральной плотности вторичного излучения, которая описывает, какую часть энергии, испускаемой люминофором j , поглощает люминофор i , а затем излучает на определённой волне λ , Вт/нм;

κ_{ij} – коэффициент эффективности такого процесса, безразмерная величина;

β_j – коэффициент вклада спектра j , j -го слоя люминофора при взаимодействии с i -м слоем, безразмерная величина.

Это позволяет учесть взаимное влияние спектров фосфоров, если фосфорный состав сильно варьируется или присутствуют фосфоры с перекрывающимися полосами поглощения и излучения.

$F_{ij}(\lambda)$ должна быть вычислена на основе известных спектров поглощения и излучения люминофоров i и j :

$$F_{i,j}(\lambda) = \kappa_{ij} \cdot \phi_{ph,i}(\lambda) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_j(\lambda') \cdot \phi_{ph,i}(\lambda') d\lambda',$$

где $A_j(\lambda')$ – спектр поглощения j -го люминофора, безразмерная функция, нормированная на максимум $A_j(\lambda') \in [0,1]$.

В результате совокупность уравнений (1) – (8) образует математическую модель, которую можно использовать для многокритериальной оптимизации. С одной стороны, в уравнениях (1), (2), (4) заложены законы сохранения энергии (через $\phi_e(\lambda)$) и известная фотопическая чувствительность глаза. С другой стороны, в формулах (6) – (7) учтены метрические концепции цветопередачи, а в (8) – биологический, меланопический аспект. Любые вариации параметров α и β_i из уравнения (1) приводят к изменению интегралов (2), (4), (6) – (8), и таким образом становится возможным поиск оптимума. Например, для обеспечения заданного качества света с контролем вышеописанных параметров требуется максимизировать световую эффективность η (из (3)) при условии, что индекс R_a не опускается ниже 80 – 85, а P_{mel} не превышает заданного или предполагаемого ограничительного значения.

Формально такая задача может быть записана как оптимизационная, где вводится функционал вида (выражение 9):

$$\begin{aligned} & \max_{\{\alpha, \beta_i\}} \eta(\alpha, \beta_i), \\ & \text{при} \\ & R_a(\alpha, \beta_i) \geq 80, \\ & P_{mel}(\alpha, \beta_i) \leq P_{mel,max}, \\ & CCT(\alpha, \beta_i) \in \Delta T, \end{aligned} \quad (9)$$

где ΔT – желаемый диапазон коррелированных цветовых температур (например, от 2700 до 4000 K);

$P_{mel,max}$ – допустимая интенсивность коротковолнового воздействия.

При необходимости можно добавить в (9) дополнительное ограничение на координаты (x, y) или детально прописать метрики TM-30-20 (Fidelity Index R_f и Gamut Index R_g) можно дополнить следующими условиями (отдельными суб-целями):

$$\begin{aligned} R_f(\alpha, \beta_i) & \geq R_f^{\min}, \\ R_g(\alpha, \beta_i) & \geq R_g^{\min}. \end{aligned}$$

Это повышает точность воспроизведения цвета по более широкому спектру тест-образцов, чем предусмотрено стандартным CRI. Расчёт R_f и R_g производится на основе интегральных характеристик цвета, полученных из $\phi_e(\lambda)$, по методике стандарта IES TM-30-18.

Таким образом, уравнения (1) - (9) представляют собой полный набор математических отношений, описывающих спектральные, фотометрические, колориметрические и биологические свойства бытового, СИД.

Именно совокупность всех этих соотношений – от фундаментального баланса энергии в (1) и (2) до колориметрических и биологических критериев в (4) – (8) – формирует математическую модель, применимую для проектирования и исследования параметров бытовых СИД-приборов, позволяя сравнивать основные параметры, влияющие на спектральные характеристики света СИД.

Полученные результаты и их обсуждение

В данном разделе произведено симуляционное моделирование и верификация предложенного системного подхода к расчёту и поиску оптимальных параметров спектрального состав бытового СИД.

Принято, что итоговая спектральная кривая $\phi_e(\lambda)$ может быть описана линейной суперпозицией спектра чипа и спектров фосфоров. Считается, что все функции зрительной и меланопической чувствительности, а также функции сложения (по стандарту CIE 1931) заданы на дискретном наборе длин волн с небольшим шагом и могут быть интерполированы. Потери в оптическом тракте СИД (отражение, рассеяние) учтены в исходных $\phi_{chip}(\lambda)$ и $\phi_{ph,i}(\lambda)$.

Оптимизация коэффициентов α и β_i , выполняется согласно целевой функции $\eta(\alpha, \beta_i)$ при выполнении ограничений (9).

В качестве исходных данных для моделирования были извлечены данные из стандартизированного отчёта ANSI/IES TM-30-20 для эталонного источника света, обозначенного как EX4 CIE F4. Выбор данного источника обусловлен необходимостью анализа параметров источников тёплого белого света, широко применяемых в бытовом освещении. Данные были представлены в виде таблицы (см. таб. 1). Согласно отчету, спектры регистрировались в диапазоне $380 \leq \lambda \leq 780$, нм с использованием калиброванного спектрорадиометра и эталонного источника в виде стандартного источника D65.

Набор данных из таблицы 1 включал длины волн (*Wavelength*) в диапазоне от 380 до 780 нм, спектральную плотность энергии (*SPD*), коррелированную цветовую температуру (*CCT*), смещение от линии чёрного тела (D_{uv}), координаты цветности в системе CIE 1976 (u' и v'), а также показатели цветопередачи R_f и R_g .

Таблица 1 - Исходные данные для источника света EX4 CIE F4, взятые отчёта ANSI/IES TM-30-20 (представлены только несколько строк из набора данных)

Длина волны (<i>Wavelength</i>), нм	Спектральная плотность энергии (<i>SPD</i>)	<i>CCT</i> (К)	Индекс смещения от линии чёрного тела (<i>D_{uv}</i>)	Координаты цветности в системе <i>CIE</i> 1931		Индекс точности цветопереда- чи <i>R_f</i>	Индекс насыщен- ости цвета <i>R_g</i>
				<i>x</i>	<i>y</i>		
380	0,018824	2939,6	-0,00074	0,44126	0,40551	56	83
381	0,019683						
382	0,020542						
...							
400	0,06638						
435	1						
...							
780	780						

В таблице 1 значения SPD приведены с шестью знаками после запятой в силу того, что при округлении SPD до 3-4 знаков после запятой возникает квантование каждого отсчёта, и при последующем суммировании по спектру эти мелкие погрешности накапливаются, давая смещения в производных метриках $x, y / CCT / D_{uv} / R_f / R_g$. Координаты x, y и индекс смещения от линии чёрного тела D_{uv} приведены с пятью знаками после запятой, что превышает распространённую практику (4 знака), умышленно – для более детальной верификации работоспособности модели на исходной сетке без дополнительного округления. Параметры R_f, R_g , как правило, округляются до целых, поскольку младшие разряды лежат ниже инструментальной точности определения.

Для анализа данных и построения модели использовались инструменты языка *Python*, включая библиотеки *pandas* для обработки данных, *numpy* для математических расчётов, *matplotlib* для визуализации результатов и *colour* для проведения колориметрических построений диаграмм.

На первом этапе была выполнена загрузка данных из *Excel*-таблицы, пример данных которой был описан выше (таблица 1). На втором этапе моделирования была построена теоретическая модель, описывающая спектральную плотность энергии светодиода как суперпозицию спектра кристалла $\phi_{chip}(\lambda)$ и спектров люминофорных покрытий $\phi_{ph,i}(\lambda)$ в сравнении с исходной SPD эталонного источника. Полученные кривые представлены на рисунок 1 (а), а координаты цветности (x, y) модели и исходных данных для источника света EX4 CIE F4 в системе цветности *CIE* 1931 представлены на рисунок 1(б). Полученные результаты указывают на ошибку моделирования SPD для исследуемого эталонного источника менее 5%.

Результаты моделирования кривой распределения спектральной мощности, представленной на графике рисунок 1 подтверждают, что предложенная модель достаточно точно описывает спектральное распределение энергии, что делает её пригодной для последующих этапов анализа и оптимизации.

Для улучшения соответствия модельных данных экспериментальным была проведена оптимизация коэффициентов α и β_i , определяющих вклад спектров кристалла и каждого слоя люминофоров в результирующий спектр, оптимизация была реализована методом полного перебора параметров с использованием следующих ограничений: α варьировался в диапазоне $[0,5, 1,5]$ с шагом 0,2, где нижняя граница ($\alpha = 0,5$) выбрана для моделирования ситуаций, когда вклад кристалла минимизирован, а спектральные характеристики формируются преимущественно люминофорами, а верхняя граница ($\alpha = 1,5$) позволяет учесть усиление излучения кристалла в случаях, когда люминофорные потери минимальны, либо мощность кристалла увеличивается за счёт конструктивных особенностей, что позволяет охватить реальные случаи для бытовых СИД, где спектр кристалла составляет от 50% до 150% итогового спектра; β_1 и β_2 , описывающие вклады первого и второго слоев люминофоров, изменились в диапазоне $[0, 2,0]$ и $[0, 1,5]$ соответственно, граничные условия выбирались из аналогичной логики.

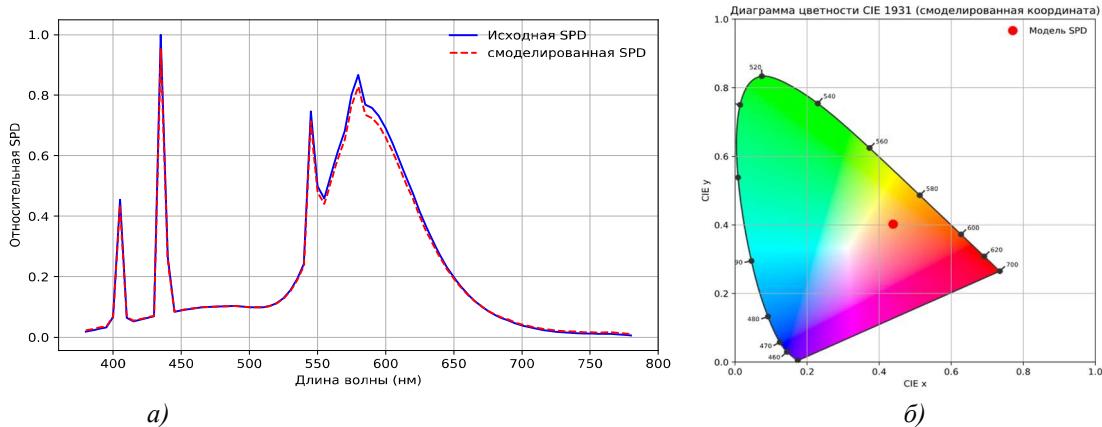


Рисунок 1 – (2) Сравнение исходного и смоделированного SPD для эталонного источника EX4 CIE F4, (б) диаграмма цветности со смоделированной координатой цвета моделируемого светодиодного источника

Смоделированная цветовая температура CCT составила 2960,16 K, что указывает на ошибку в сравнении с исходными данными менее 1%.

На рисунок 2 представлены графики, иллюстрирующие зависимости световой эффективности η от индекса цветопередачи CRI и коррелированной цветовой температуры CCT для различных значений параметров модели.

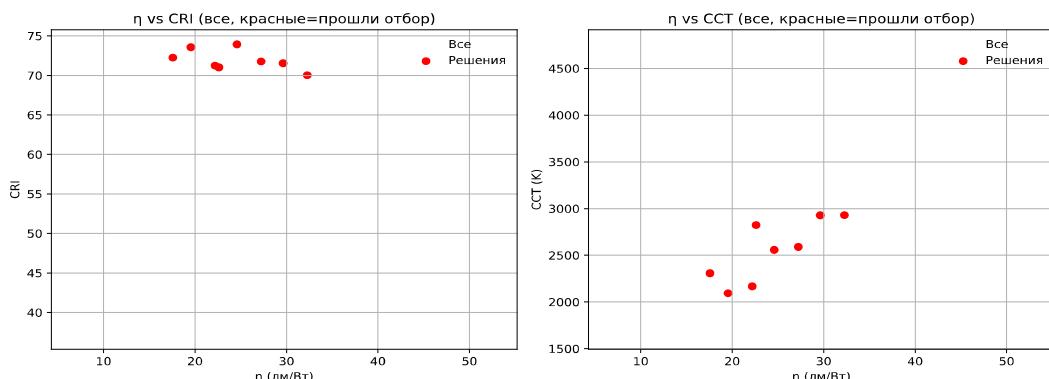


Рисунок 2 – Зависимости оптимальной световой эффективности η от заданных параметров индекса цветопередачи CRI и коррелированной цветовой температуры CCT (слева зависимость выбора оптимальных параметров η от CRI , справа – зависимость η от CCT)

Из рисунка 3 видно, что при увеличении световой эффективности η наблюдается закономерное снижение CRI , что отражает известный компромисс между энергоэффективностью и качеством цветопередачи.

На рисунок 3 представлена трёхмерная визуализация взаимосвязи между световой эффективностью η , индексом цветопередачи CRI и коррелированной цветовой температурой CCT . Цветовая шкала на графике отражает уровень меланопического воздействия P_{mel} , от меньшего к большему воздействию.

Рисунок 3 демонстрирует области, где баланс между световой эффективностью, качеством цветопередачи и биологическим воздействием достигается одновременно. Эти решения находятся в зонах средней CCT (3000 – 4000 K) с CRI около 70 – 75 и η на уровне 20 – 40 лм/Вт. Представленные результаты подчёркивают возможность достижения сбалансированных решений для бытовых осветительных приборов, где световая эффективность сочетается с высоким качеством цветопередачи.

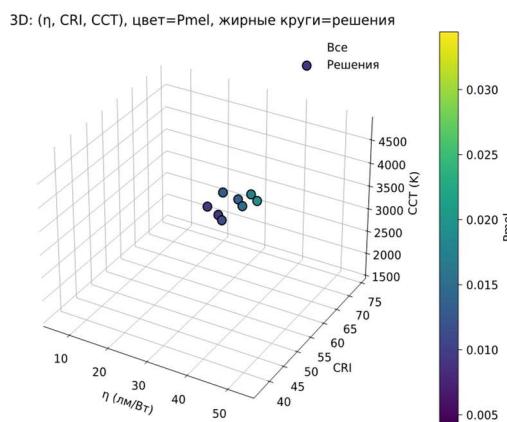


Рисунок 3 – 3D-график зависимости η , CRI и CCT с цветовым кодированием уровня меланопического воздействия P_{mel}

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало эффективность предложенной модели для анализа и оптимизации спектральных характеристик бытовых светодиодов. Построенная модель позволяет учитывать широкий спектр параметров, включая вклад кристалла светодиода и люминофорных покрытий, их температурные зависимости, а также параметры цветопередачи и биологического воздействия света. Полученные результаты демонстрируют, что предложенная методология позволяет не только воспроизвести экспериментальные данные с высокой точностью, но и предложить пути улучшения характеристик источников света.

Одним из ключевых выводов исследования стало подтверждение компромисса между световой эффективностью, качеством цветопередачи и биологическим воздействием света.

Для реализации предложенных улучшений на практике рекомендовано применять комбинацию нескольких подходов. Во-первых, использование многослойных люминофорных покрытий может позволить оптимизировать спектральное распределение энергии, повысив эффективность в видимом диапазоне. Во-вторых, регулировка рабочих параметров светодиодов, таких как температура p - n перехода и ток, может способствовать снижению нежелательного коротковолнового излучения. Так же, применение дополнительных спектральных фильтров и вспомогательных источников света может быть полезным для коррекции спектра и повышения качества цветопередачи.

Таким образом, представленная модель не только позволяет анализировать текущие характеристики светодиодных источников света, но и служит инструментом для их проектирования с учётом как визуальных, так и биологических требований. Результаты исследования могут быть использованы при разработке новых поколений энергоэффективных бытовых осветительных приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Д.С., Кузнецов Д.И. Понимание эволюции и применения светоизлучающих диодов (LED). Современные инновации, системы и технологии, т. 3, № 4, 2023, с. 0601-0614. DOI: 10.47813/2782-2818-2023-3-4-0601-0614.
 2. Пясецкий В.Б., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф., Павлов В.Ю. Цветовая эффективность светодиодных осветительных систем. Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение», № 5 (116), 2017, с. 54-69.
 3. Кузьменко В.П., Шишлаков В.Ф., Солёный С.В., Квас Е.С., Солёная О.Я. Исследовательские испытания светодиодных источников света. Известия высших учебных заведений. Приборостроение, т. 62, № 7, 2019, с. 632-640.
 4. Xu J.-W., Chen G.-Q. Realizing white LEDs with high luminous efficiency and high color rendering index by using double green phosphors. Results in Physics, 2019, т. 15, ст. 102648. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102648.
 5. Горячева М.Ю., Жирнова Е.А. Метрологическое обеспечение оценки качества и безопасности светодиодных ламп. Решетневские чтения, т. 2, 2018, с. 38-39.

6. Lee S., Yoon H. LED lighting system for better color rendition space: The effect of Color Rendering Index. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2020, т. 20. DOI: 10.1080/13467581.2020.1799801.
7. Royer M., Wei M., Wilkerson A., Safranek S. Experimental validation of color rendition specification criteria based on ANSI/IES TM-30-18. Lighting Research and Technology, 2019, т. 52. DOI: 10.1177/1477153519857625.
8. Hung L.-W., Anderson S.J., Pipkin A., Fristrup K. Changes in night sky brightness after a countywide LED retrofit. Journal of Environmental Management, 2021, т. 292, ст. 112776. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112776.
8. Курочкина В.А., Жирякова А.Е. Световое загрязнение как фактор влияния на человека и окружающую среду. Вестник евразийской науки, 2022, т. 14, № 1, с. 32.
10. Оморов Т.Т., Рахимов Д.М. Исследование характеристик освещения при применении современных энергосберегающих светильников. Research Focus, т. 2, № 1, 2023, с. 200-209.
11. Андреева М.В., Солдаткин В.С., Туев В.И., Кичук С.Н. Разработка методики оценки пространственного распределения цветовых параметров в шагах МакАдама. Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение», № 1 (146), 2024, с. 4-18.
12. Zhong P., He G., Zhang M. Spectral optimization of the color temperature tunable white light-emitting diode (LED) cluster consisting of direct-emission blue and red LEDs and a diphosphor conversion LED. Opt. Express, 2012, т. 20, с. A684-A693.
13. Benkner S., Herzog A., Klir S., Driel W., Khanh T. Advancements In Spectral Power Distribution Modeling Of Light-Emitting Diodes. IEEE Access, 2022.
14. Романова М.А. Исследование тепловых режимов светодиодных источников света. Известия Алтайского государственного университета, № 1 (135), 2024, с. 50-55. DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-06.
15. Кузьменко В.П., Солёный С.В. Модель предиктивного обслуживания для управления качеством сетей светодиодного освещения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 155-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-155-169>.

Кузьменко Владимир Павлович

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения»
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
электромеханики и робототехники (№32)
190000 г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская д.
67 лит.А
E-mail: mr.konnny@gmail.com

KUZMENKO V.P.

MODELING OPTIMAL PARAMETERS OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF HOUSEHOLD LIGHT-EMITTING DIODES

Abstract. *In designing high-quality LED lighting devices that provide a required level of illumination quality without noticeable deterioration over a prolonged operating period, it is necessary to consider multiple parameters. Among the key factors are luminous efficacy, longevity, color rendering, and safety. Due to their high luminous efficiency, extended service life, flexible options for managing luminous flux via pulse-width modulation in power supply units, and substantially more compact size compared to conventional light sources (incandescent, fluorescent, etc.), LED-based lighting devices currently represent the most promising choice for household applications.*

The objective of this work is to develop a model that can generate the spectral characteristics of residential light-emitting diodes (LEDs) as a function of luminous and color efficiency parameters, p-n junction temperature, and the melanopsic component of the spectrum. To enhance the physical accuracy of the model, temperature corrections for the p-n junction and interphase energy transfer between phosphor layers have been incorporated. The model was validated using data from the EX4 CIE F4 reference light source provided in the ANSI/IES TM-30-20 standard, employing photometric sensitivity equations, spectral superposition principles, and standard color matching functions.

The proposed model takes into account the combined emission from the LED chip and the phosphor layer, described via the spectral power distribution function, photometric parameters (luminous flux, luminous efficacy), colorimetric indices (chromaticity coordinates, correlated color temperature, color rendering indices), and the biological effect of light (melanopic action). To increase physical accuracy, the model includes p-n-junction temperature corrections and the interphase energy transfer between phosphor layers. Verification results indicate that the error in reproducing the spectral characteristics is under 5%. Furthermore, the model clarifies which optimal spectral composition parameters are required to achieve a balance between luminous efficacy, color rendering quality, and minimal biological impact.

Keywords: LED quality management, spectral analysis, LED efficiency, spectral analysis model, optical temperature determination method, light quality

BIBLIOGRAPHY

1. Borisov D.S., Kuznetsov D.I. Understanding the evolution and application of light-emitting diodes (LED). Sovremennye innovatsii, sistemy i tekhnologii [Modern Innovations, Systems and Technologies], vol. 3, no. 4, 2023, pp. 0601-0614. DOI: 10.47813/2782-2818-2023-3-4-0601-0614. (In Russ.)
2. Pyasetsky V.B., Khorokhorov A.M., Shirankov A.F., Pavlov V.Yu. Color efficiency of LED lighting systems. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya «Priborostroenie» [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series «Instrumentation»], no. 5 (116), 2017, pp. 54-69. (In Russ.)
3. Kuzmenko V.P., Shishlakov V.F., Solyony S.V., Kvas E.S., Solyona O.Ya. Research testing of LED light sources. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie [Herald of Higher Educational Institutions. Instrumentation], vol. 62, no. 7, 2019, pp. 632-640. (In Russ.)
4. Xu J.-W., Chen G.-Q. Realizing white LEDs with high luminous efficiency and high color rendering index by using double green phosphors. Results in Physics, 2019, vol. 15, article 102648. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102648.
5. Goryacheva M.Yu., Zhirnova E.A. Metrological support for the assessment of quality and safety of LED lamps. Reshetnyevskie chteniya [Reshetnyev Readings], vol. 2, 2018, pp. 38-39. (in Russ.)
6. Lee S., Yoon H. LED lighting system for better color rendition space: The effect of Color Rendering Index. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2020, vol. 20. DOI: 10.1080/13467581.2020.1799801.
7. Royer M., Wei M., Wilkerson A., Safranek S. Experimental validation of color rendition specification criteria based on ANSI/IES TM-30-18. Lighting Research and Technology, 2019, vol. 52. DOI: 10.1177/1477153519857625.
8. Hung L.-W., Anderson S.J., Pipkin A., Fristrup K. Changes in night sky brightness after a countywide LED retrofit. Journal of Environmental Management, 2021, vol. 292, article 112776. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112776.
9. Kurochkina V.A., Zhyryakova A.E. Light pollution as a factor affecting humans and the environment. Vestnik evraziiskoi nauki [Herald of Eurasian Science], 2022, vol. 14, no. 1, p. 32. (in Russ.)
10. Omorov T.T., Rakhimov D.M. Investigation of lighting characteristics when using modern energy-saving lamps. Research Focus, vol. 2, no. 1, 2023, pp. 200-209. (in Russ.)
11. Andreeva M.V., Soldatkin V.S., Tuev V.I., Kichuk S.N. Development of a methodology for assessing the spatial distribution of color parameters in MacAdam steps. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya «Priborostroenie» [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series «Instrumentation»], no. 1 (146), 2024, pp. 4-18. (in Russ.)
12. Zhong P., He G., Zhang M. Spectral optimization of the color temperature tunable white light-emitting diode (LED) cluster consisting of direct-emission blue and red LEDs and a diphosphor conversion LED. Opt. Express, 2012, vol. 20, pp. A684-A693.
13. Benkner S., Herzog A., Klir S., Driel W., Khanh T. Advancements In Spectral Power Distribution Modeling Of Light-Emitting Diodes. IEEE Access, 2022.
14. Romanova M.A. Investigation of thermal regimes of LED light sources. Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta [Herald of Altai State University], no. 1 (135), 2024, pp. 50-55. DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-06. (In Russ.)
15. Kuzmenko, V.P., & Solyony, S.V. (2023). Model' prediktivnogo obsluzhivaniya dlya upravleniya kachestvom setey svetodiodnogo osveshcheniya [A predictive maintenance model for managing the quality of LED lighting networks]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova, 21(3), 155-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-155-169> (In Russ.)

Kuzmenko Vladimir Pavlovich

St. Petersburg State University of Aerospace
Instrumentation
Candidate of technical science, docent, Associate
Professor of the Department of Electromechanics and
Robotics (No. 32)
190000 St. Petersburg, ul. Bolshaya Morskaya d. 67 lit.A
E-mail: mr.konnny@gmail.com

© Кузьменко В.П., 2025

ЭССЕЛЬБАХ Р.В., ГОРЕЛЬНИКОВ С.А., ФРОЛКОВ К.Г., ДЗЮБА Д.П.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРИВОДА ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ТЕЛЕСКОПА ТПЛ-1М

Аннотация. Современные технологические процессы, использующие пространственное позиционирование инструмента при помощи шаговых двигателей, требуют высокой точности и надежности от оборудования, но старые системы управления часто этим требованиям не соответствуют. В работе показан процесс модернизации привода шагового двигателя ШД-5 телескопа ТПЛ-1М, направленной на улучшение его характеристик. Устаревшая аналоговая система управления заменена современной, включая элементную базу, микроконтроллерное управление и двухквадрантные ШИМ-преобразователи. В результате достигнуто повышение точности позиционирования, снижение энергопотребления и вибраций, а также обеспечена возможность интеграции с современными системами управления. Подробно описаны структурные и функциональные схемы модернизированного привода, модули управления обмотками, опторазвязки, питания. Описана методика коммутации обмоток, повышающая КПД. Работа демонстрирует эффективный способ обновления оборудования без замены основного двигателя и продления жизненного цикла телескопа ТПЛ-1М, превращая его в конкурентоспособный инструмент для современных астрономических задач.

Ключевые слова: электропривод, шаговый двигатель, система управления, схема коммутации обмоток.

Введение

Телескоп ТПЛ-1М, разработанный в СССР для наблюдения за искусственными спутниками Земли (ИСЗ), до сих пор остается востребованным инструментом для решения ряда астрономических задач, таких как лазерная локация, оптический мониторинг околоземного пространства, астро- и фотометрические измерения [1]. Однако его системы управления, созданные несколько десятилетий назад, уже не соответствуют современным требованиям к точности, скорости и автоматизации.

Одним из ключевых узлов, ограничивающих возможности телескопа, является привод шагового двигателя ШД-5. Хотя сам двигатель обладает достаточным моментом и надежностью, однако его аналоговая силовая часть (драйверы, блок питания, схемы управления) существенно ухудшает общие характеристики системы [2], которые обусловлены:

- высокими энергопотерями и нагревом компонентов;
- вибрацией и шумом при работе;
- отсутствием цифрового управления, что исключает интеграцию с современным ПО;
- большими массогабаритными показателями.

В данной работе рассматривается модернизация силовой части привода телескопа ТПЛ-1М при сохранении штатного двигателя ШД-5.

Внедрение современной элементной базы, блока питания и микроконтроллерного управления позволяет:

- увеличить точность наведения (уменьшить ошибку позиционирования);
- обеспечить плавность хода и снизить вибрации;
- снизить энергопотребление и повысить надежность;
- интегрировать современные системы управления (компьютерное управление, поддержка ASCOM).

Основная часть

Работа основана на практическом опыте усовершенствования ТПЛ-1М в условиях ограниченного финансирования. Замена управляющей схемы - это оптимальный компромисс между затратами и эффектом. Двигатель ШД-5 сохраняет рабочие параметры, а новые компоненты добавляют и улучшают функционал оригинальной конструкции: повышается КПД использования двигателя, повышается максимальная скорость передвижения телескопа, что позволяет наблюдать объекты на более низких орбитах, позволяет существенно снизить вибрации при разгоне и торможении телескопа.

За время эксплуатации ШД-5 было разработано несколько модификаций электроприводов для управления [3]. Основные параметры двигателя приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры ШД-5

Параметры	Значение	
N	Число фаз	6
U	Напряжение питания, В	48
I	Ток в цепи фазовой обмотки, А	3
w	Число тактов коммутации	12
α	Шаг, г	1,5
$\delta\alpha$	Статистическая погрешность шага, мин	27
J	Момент инерции нагрузки, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	$4\cdot10^{-6}$
$\Delta\omega$	Приемистость, грм	500
ω	Максимальная частота отработки, грм	4000
M_m	Максимальный момент отработки шага, $\text{N}\cdot\text{м}$	0,4
t_a	Время разгона до 4000 грм, с	0,15
$l \times d$	Габаритные размеры, mm^2	160×80
m	Масса, кг	2,2
t_{sh}	Минимальное время работы, ч	5000

Отличием внедряемой схемы от ранее разработанных вариантов приводов состоит в том, что каждая фаза двигателя управляется током от своего усилителя мощности на основе двухквадрантного ШИМ преобразователя [4].

Структурная схема усилителя мощности приведена на рисунке 1.

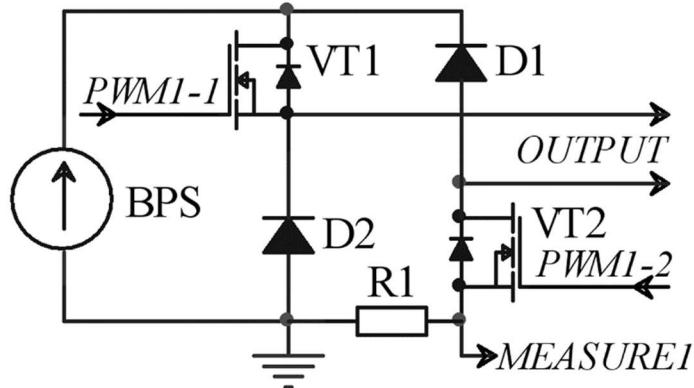


Рисунок 1 – Структурная схема усилителя мощности

Силовая часть выполнена в виде мостового преобразователя, состоящего из двух управляемых ключей VT1 и VT2, и двух неуправляемых – D1 и D2. Такая схема позволяет стабилизировать ток одной полярности с возможностью рекуперации энергии, запасенной в индуктивности обмотки двигателя в процессе работы. Рекуперация энергии осуществляется в буферное питание электропривода.

Модуль управления, обеспечивающий работу электропривода построен на базе ПЛИС EPM240T100C3 (рисунок 2). Все управляющие сигналы поступают с ПЛИС на силовой модуль управления обмотками двигателя и схему управления поддержания тока в обмотках.

Функциональная схема соединения основных модулей электропривода приведена на рисунке 2.

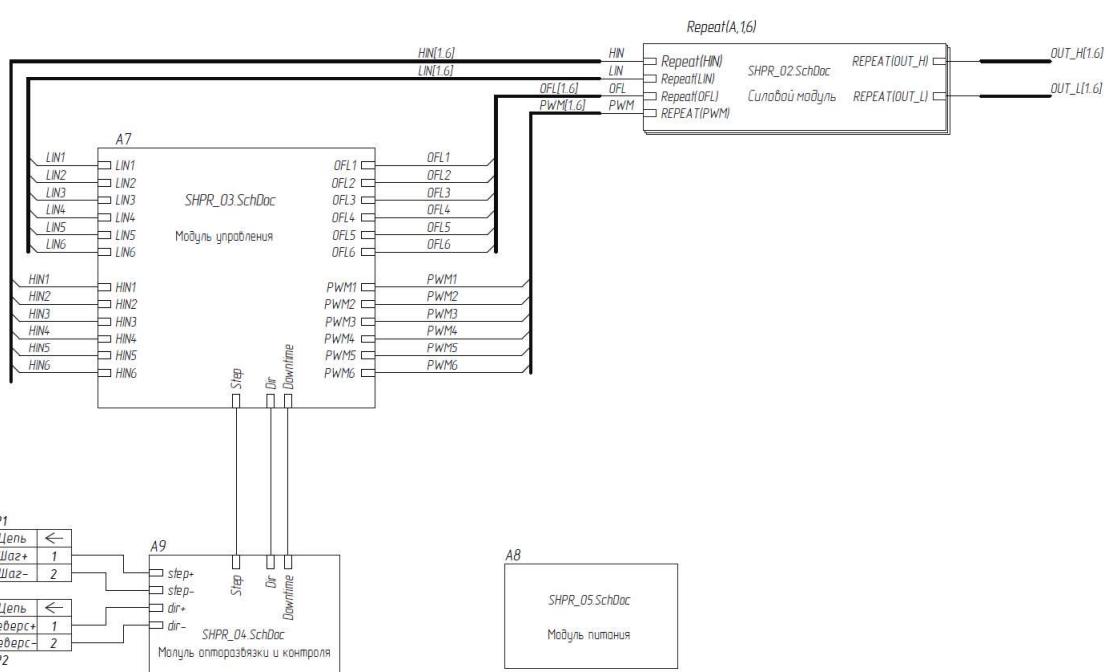


Рисунок 2 - Функциональная схема соединения основных модулей электропривода

На схеме модуль SHRP_02 изображен один, для упрощения схемы. В реальности, их количество соответствует количеству управляемых обмоток двигателя ШД-5. Схема модуля SHRP_02 приведена на рисунке 3.

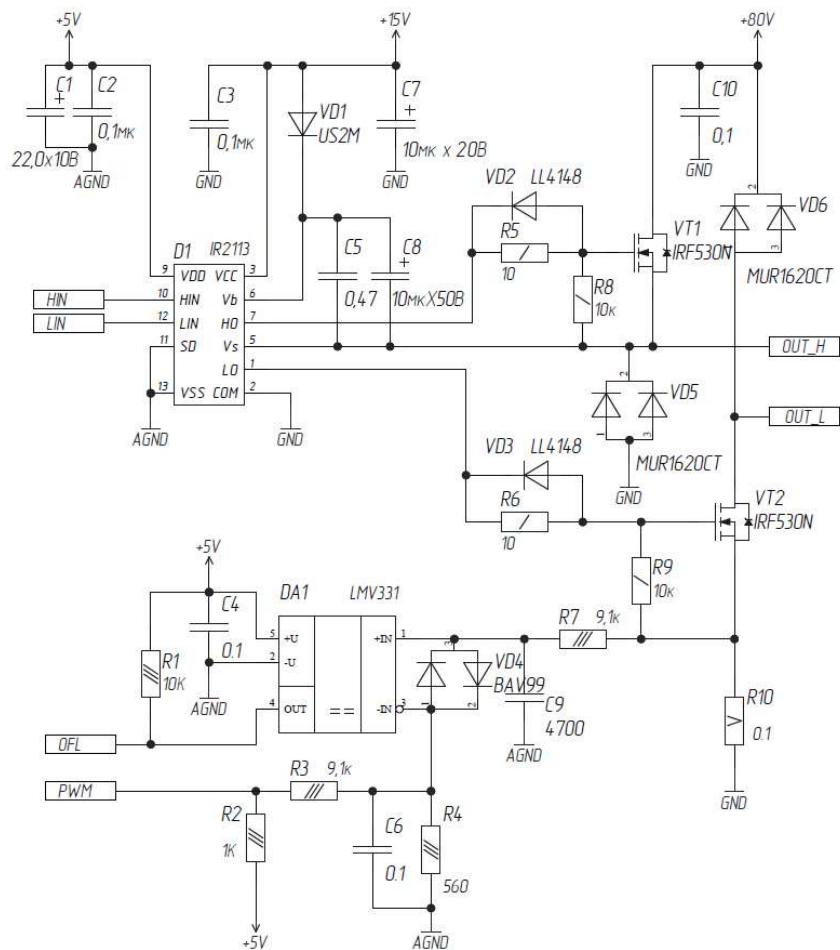


Рисунок 3 - Силовой модуль управления обмотками электродвигателя ШД-5

Модуль SHRP_02 включает в себя драйвер D1 (IR2113) управления силовыми ключами. Вход HIN служит для управления верхним ключом силового моста. Вход LIN – для управления нижним ключом силового моста. DA1 (LMV 331) быстродействующий компаратор, выполняющий роль стабилизатора тока в цепи обмотки электродвигателя ШД-5. Вход PWM предназначен для задания тока в обмотках двигателя, сигнал поступает с ПЛИС и задает величину тока в обмотке. Так же этот вход служит для уменьшения тока в обмотке в режиме "удержания" (момент, когда двигатель находится в режиме покоя). Выход OFL, сигнал обратной связи по току в обмотке двигателя.

Для предотвращения ложных срабатываний при возникновении помех, добавлены модули опторазвязки и контроля работы двигателя в режиме "удержания" (SHRP_04). Схема представлена на рисунке 4.

Сигналы управления вращения двигателя поступают на вход оптронов H11L1, которые имеют в своем составе триггер Шмидта, что предотвращает ложные срабатывания при возникновении помех. На таймере 1006ВИ1 собран узел контроля наличия шаговых импульсов, при пропадании которых, схема выдает сигнал для перехода в режим "Удержания", что предотвращает перегрев двигателя [5].

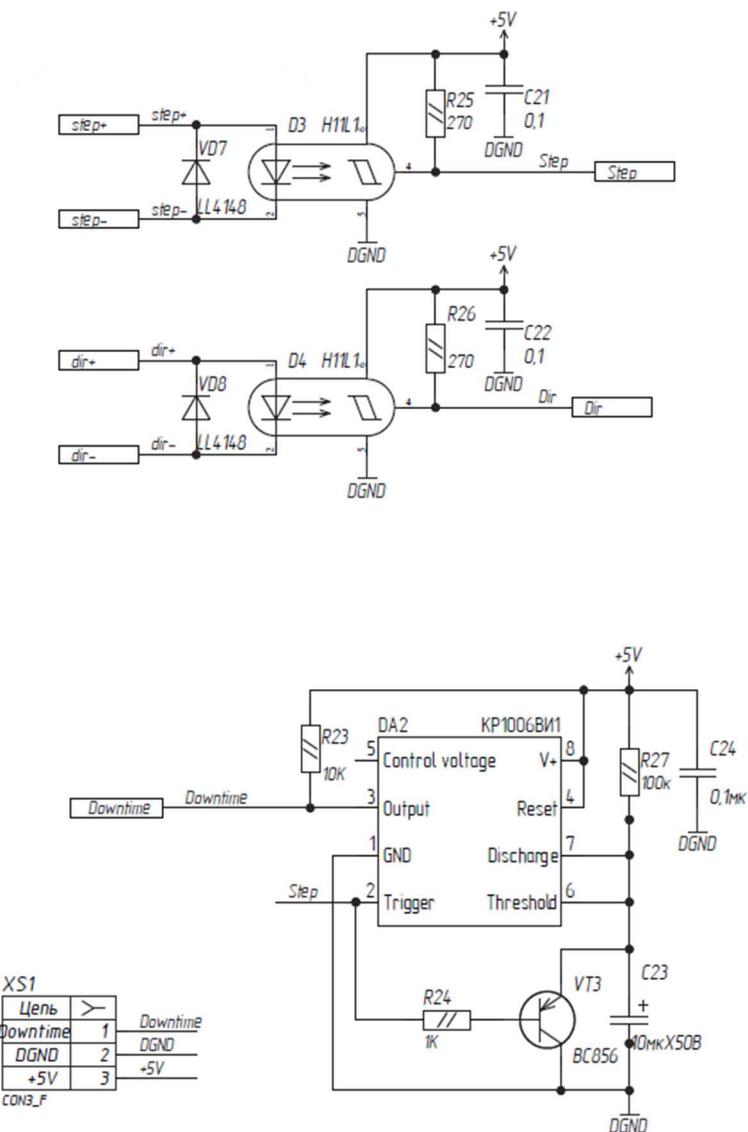


Рисунок 4 - Модуль опторазвязки и контроля работы двигателя в режиме «удержания»

На рисунке 5 представлен модуль питания схемы управления и обмоток двигателя ШД-5 (SHRP_05).

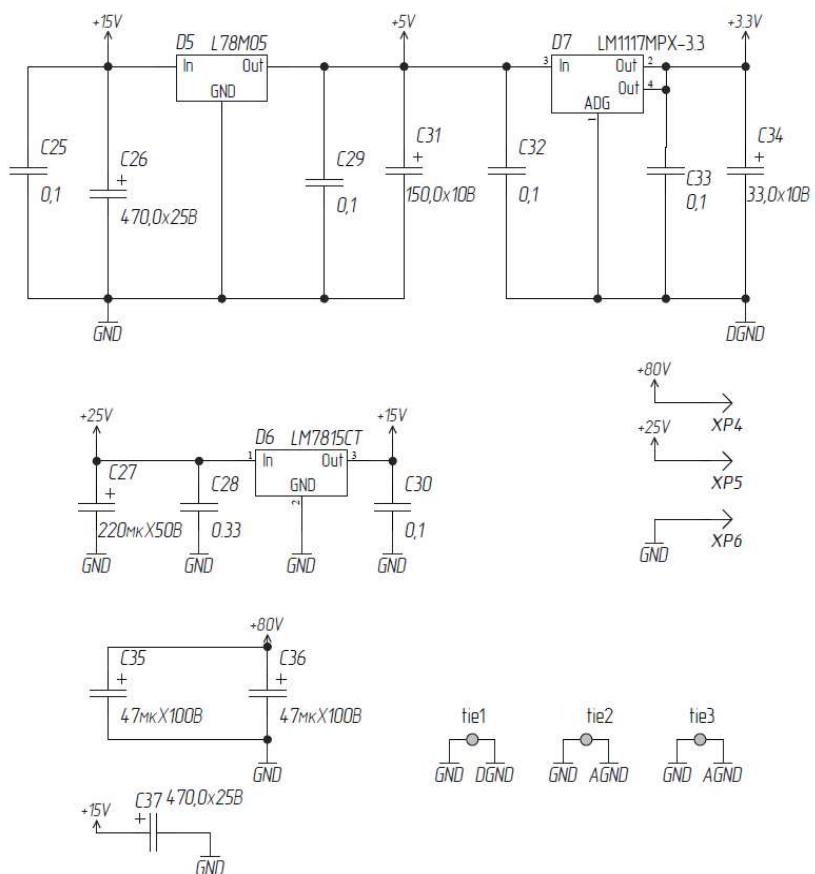


Рисунок 5 - Модуль питания

Для получения необходимых для работы системы напряжений был применен тороидальный трансформатор как более надежный при длительной работе электропривода в условиях постоянно меняющихся погодных условиях.

В классической схеме используется следующая последовательность коммутации обмоток:

123 – 23 – 234 – 34 -345 – 45 456 – 56 -561 – 61 – 612 - 12.

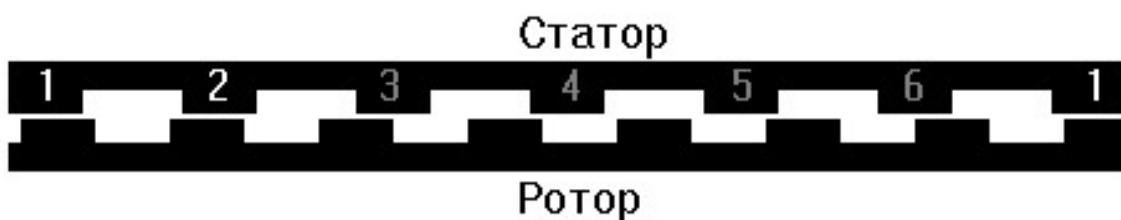


Рисунок 6 - Положение зубцов ротора и статора в развернутом виде при возбуждении фаз 1 и 2

Использование в схеме коммутации тактов одновременного включения фаз двигателя из разных статоров приводит к неполному использованию силовых свойств двигателя потому, как не полностью используется объём статора (рисунок 6). Это связано с тем, что в таких коммутациях в одном из статоров включается всегда только одна фаза. При этом магнитный поток, замыкающийся через зубцы ротора – статора в два раза меньше (пренебрегая намагниченностью стали), чем в случае коммутации двух, соседних в статоре, обмоток.

С целью улучшения характеристик двигателя, применена следующая схема коммутации обмоток:

123 – 1234 – 234 – 2345 – 345 – 3456 – 456 – 4561 – 561 – 5612 – 612 – 6123.

По сравнению с классической схемой коммутации такая конфигурация позволяет повысить КПД, полезная энергия шагового двигателя с новой схемой коммутации возрастает

(рисунок 7). При этом за два такта стало включаться семь обмоток вместо пяти. Значит, потребляемая энергия тоже возросла, тем не менее, КПД двигателя с новой схемой включения фаз стал выше [6].

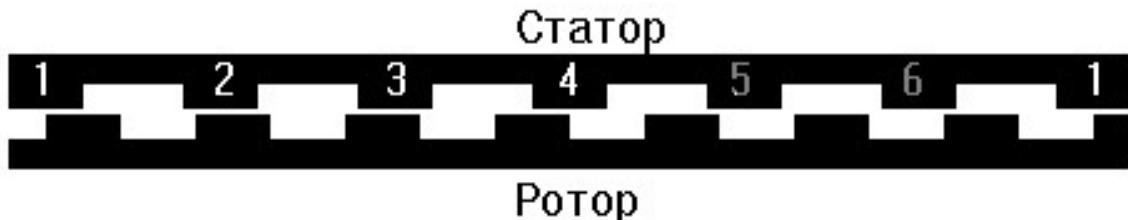


Рисунок 7 - Положение зубцов ротора и статора в развернутом виде при возбуждении фаз 1, 2, 3, 4

Заключение

На основе вышеизложенного, был создан рабочий прототип силовой части привода шагового двигателя ШД-5. Внешний вид приведен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид силового привода для ШД-5

Как видно из рисунка, массогабаритные размеры такого привода существенно меньше его классического предшественника.

Предложенная модернизация не только продлевает жизненный цикл телескопа ТПЛ-1М, но и превращает его в конкурентоспособный инструмент, сочетающий надежность советской инженерной школы с преимуществами современных технологий. Работа служит удачным примером рационального обновления устаревшего оборудования без полной замены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.И.Кудак, В. П. Епишев, В.М.Периг, И.Ф.Найбауер Определение ориентации и периода вращения спутника Торекс/Poseidon фотометрическим методом / В.И.Кудак, В. П. Епишев, В.М.Периг, И.Ф.Найбауер // Астрофизический бюллетень. - 2017. - № 3(72). - С. 372-381.
2. В.Лапошка Распределитель импульсов для шаговых двигателей / В.Лапошка // ASTRONOMIJA 20 ACT A UNIVERSITATI S LATVIENSI S. - 1995. - № vol. 600. - С. 27-30.
3. Кротов, С.В.. Блоки управления шаговыми двигателями в стандарте КАМАК / С. В. Кротов. - Новосибирск : ИЯФ, 1982. - 12 с. : 20 см - (Препринт, /, Ин-т ядер. физики СО АН СССР, 82-99).
4. Беликов, О. В. Электропривод для шагового двигателя ШД5/ О.В. Беликов, Э.Л. Неханевич, Ш.Р. Сингатулин. - Новосибирск : Ин-т ядер. физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 2002 (Рот. ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН). - 14 с. : ил., схем., табл.; 20 см. - (Научно-исследовательское учреждение Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН; ИЯФ 2002-66).
5. Дауров, В. Г. Управление шаговыми приводами электроискровых вырезных прецизионных станков с программным управлением / В. Г. Дауров // Электронная обработка материалов. - 1982. - № 1 (103). - С. 74-80.
6. О.В. Беликов, А.С. Медведко, Ш.Р. Сингатулин. Привод для 6-тифазного шагового двигателя. Журнал “Силовая интеллектуальная электроника” №1(7), 2007г., стр. 27, Новосибирск.

Эссельбах Роман Вадимович

ФГБОУ ВО «ДонГТУ»

м.н.с. ЦЛОИ «Орион»

(294204, ЛНР, г. Алчевск, пр-кт Ленина, д. 16)

+79591296635

diabazer@yandex.ru

Горельников Сергей Анатольевич

ФГБОУ ВО «ДонГТУ»

Директор ЦЛОИ «Орион»

(294204, ЛНР, г. Алчевск, пр-кт Ленина, д. 16)

+7 959 501-70-60

gsaserg69@mail.ru

Фролков Константин Георгиевич

ФГБОУ ВО «ДонГТУ»

Техник 1 категории ЦЛОИ «Орион»

(294204, ЛНР, г. Алчевск, пр-кт Ленина, д. 16)

+7 959 119-97-53

kfrolkov@mail.ru

Дзюба Денис Петрович

ФГБОУ ВО «ДонГТУ»

Инженер 2 категории ЦЛОИ «Орион»

(294204, ЛНР, г. Алчевск, пр-кт Ленина, д. 16)

+7 959 128-97-30

xarann@mail.ru

EESSELBAKH R.V., GOREL'NIKOV S.A., FROLKOV K.G., DZYUBA D.P.

MODERNIZATION OF THE STEPPER MOTOR DRIVE OF THE TPL-1M TELESCOPE

Abstract. *Modern technological processes relying on spatial positioning of tools via stepper motors demand high precision and reliability from equipment, yet legacy control systems often fail to meet these requirements. This study presents the modernization of the SD-5 stepper motor drive in the TPL-1M telescope, aimed at improving its performance. The outdated analog control system was replaced with a modern solution, including updated circuitry, microcontroller-based control, and dual-quadrant PWM converters. As a result, positioning accuracy was enhanced, energy consumption and vibrations were reduced, and compatibility with modern control systems was achieved.*

The paper details the structural and functional diagrams of the upgraded drive, including winding control modules, optoelectronic isolation, and power supply circuits. A winding commutation method that improves efficiency is described. The study demonstrates an effective approach to modernizing equipment without replacing the core motor, thereby extending the service life of the TPL-1M telescope and transforming it into a competitive tool for contemporary astronomical applications.

Keywords: electric drive, stepper motor, control system, winding commutation circuit.

BIBLIOGRAPHY

1. Kudak, V. I., Epishev, V. P., Perig, V. M., & Naibauer, I. F. (2017). Determination of the Topex/Poseidon satellite's orientation and rotation period using a photometric method. *Astrophysical Bulletin*, 72(3), 372–381.
2. Laposhka, V. (1995). Pulse distributor for stepper motors. *ASTRONOMIJA 20 ACTA UNIVERSITATIS LATVIENSIS*, 600, 27–30.
3. Krotov, S. V. (1982). Stepper motor control units in the CAMAC standard. Institute of Nuclear Physics. (Preprint No. 82-99).
4. Belikov, O. V., Nekhanovich, E. L., & Singatulin, Sh. R. (2002). Electric drive for the SD-5 stepper motor. Budker Institute of Nuclear Physics. (Report No. 2002-66).
5. Daurov, V. G. (1982). Control of stepper drives in precision-programmed electrospark cutting machines. *Electronic Material Processing*, 103(1), 74–80.
6. Belikov, O. V., Medvedko, A. S., & Singatulin, Sh. R. (2007). Drive for a 6-phase stepper motor. *Journal "Intelligent Power Electronics"*, 1(7), 27.

Esselbakh Roman Vadimovich

FSBEI HE «Donbass STU»

Junior Researcher, "Orion" LOOC

16 Lenin Avenue, Alchevsk, LPR, 294204, Russia

+7 959 129-66-35

diabazer@yandex.ru.

Gorelnikov Sergei Anatolevich

FSBEI HE «Donbass STU»

Director, "Orion" LOOC

16 Lenin Avenue, Alchevsk, LPR, 294204, Russia

+7 959 501-70-60

gsaserg69@mail.ru.

Frolkov Konstantin Georgievich

FSBEI HE «Donbass STU»

First Category Technician, "Orion" LOOC

16 Lenin Avenue, Alchevsk, LPR, 294204, Russia

+7 959 119-97-53

kfrolkov@mail.ru.

Dzyuba Denis Petrovich

FSBEI HE «Donbass STU»

Second Category Engineer "Orion" LOOC

16 Lenin Avenue, Alchevsk, LPR, 294204, Russia

+7 959 128-97-30

xarann@mail.ru

ЛОКТИОНОВА Ю.И.

ФАКТОРЫ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА: ВЛИЯНИЕ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аннотация. Работа посвящена исследованиям влияния факторов космического полета (КП) на параметры микроциркуляторно-тканевых систем (МТС) организма человека. Описаны реальные и моделируемые факторы КП и вызываемые ими физиологические эффекты. Обоснован комплексный подход к мониторингу функционального состояния организма при подготовке космонавтов к полету. Разработан алгоритм мониторинга МТС с помощью распределенной системы мультиомодальных портативных анализаторов микроциркуляции крови и окислительного метаболизма биотканей при воздействии отдельных моделируемых факторов КП. Показана роль МТС в поддержании гомеостаза в условиях гипоксии и гипобарии. Полученные результаты могут стать основой персонифицированного подхода к подготовке космонавтов на основе критерии оценки функциональных резервов и адаптационного потенциала организма

Ключевые слова: лазерная допплеровская флюометрия, флуоресцентная спектроскопия, портативные мультиомодальные анализаторы, микроциркуляторно-тканевые системы, факторы космического полета.

Введение

Во время космического полета (КП) человек попадает в экстремальную среду, где на его организм одновременно воздействует множество неблагоприятных факторов космического полета (ФКП): от невесомости и космической радиации до изоляции и циркадных нарушений, что вызывает комплексные физиологические изменения, затрагивая все системы организма. Отсутствие гравитации при КП приводит к наибольшим изменениям в системе кровообращения как во время КП, так и после его завершения при реадаптации организма к условиям земной гравитации [1]. Существующие работы демонстрируют изменения вариабельности сердечного ритма у космонавтов в длительных миссиях, а также повышение риска послеполетной ортостатической непереносимости [2, 3]. Наряду с функцией крупных сосудов и насосной функцией сердца, ключевую роль в адаптации к невесомости играет микроциркуляторное звено и сосудистая реактивность, так, научные работы о функционировании сердечно-сосудистой системы в условиях космического полёта подчёркивают, что спектр изменений охватывает как центральную гемодинамику организма, так и периферическое кровообращение [1]. Аналоги гипогравитации также приводят к сдвигам сосудистого тонуса, перераспределению объёма крови и вызывают признаки ускоренного сосудистого старения уже в первые дни экспозиции [4].

Несмотря на многолетние исследования влияния ФКП на организм человека, наличие нерешенных вопросов указывает на необходимость дальнейших фундаментальных и прикладных исследований, направленных на повышение безопасности подготовки космонавтов и космических туристов, оптимизацию условий длительных миссий и совершенствование программ послеполетной реабилитации. В связи с чем активно развивается направление, посвященное исследованию микроциркуляторно-тканевых систем (МТС) как конечного звена системы кровообращения и первого звена метаболических процессов организма. МТС представляют собой структурно-функциональные единицы органов, включающие как микроциркуляторное звено системы кровообращения, так и клетки биоткани. МТС выполняют функции трофики тканей и первыми участвуют как в адаптационных реакциях организма, так и в развитии патологий [5]. Приведенные морфофункциональные особенности, а также существующие технические возможности регистрации параметров МТС делают их перспективным объектом исследования в области экстремальной физиологии и космической медицины [6].

Таким образом, целью данной работы явилась оценка возможностей регистрации параметров микроциркуляторно-тканевых систем организма космонавтов при воздействии отдельных моделируемых факторов космического полета с помощью распределенной системы портативных мультиомодальных анализаторов.

Факторы космического полета

Несмотря на обширный спектр ФКП, можно выделить несколько наиболее значимых по степени влияния на организм факторов, таких как микрогравитация (невесомость), перегрузки, вестибулярные воздействия, радиация, гиперкапния, изоляция и др.

Микрогравитация. Основным фактором КП, оказывающим системное влияние на организм человека, является микрогравитация. Отсутствие действия силы тяжести нивелирует гидростатический градиент давления, что обуславливает перераспределение жидкостей в краниальном направлении [7] и приводит к ощущению опухания лица и заложенности носа. В условиях невесомости происходит уменьшение объема циркулирующей крови, что ведет к ортостатической непереносимости при возвращении на Землю. Несмотря на то, что в полете сердечно-сосудистая система функционирует относительно эффективно, ценой этого выступает резко ускоренное старение системы кровообращения [8]. Также во время КП у космонавтов наблюдаются симптомы повышения окислительного стресса [9] совместно с ускоренной потерей костной массы до 1–2% в месяц [10].

Одной из моделей невесомости является сухая иммерсия (СИ), на 3-и сут нахождения в которой наблюдается перераспределение жидкости в краниальном направлении, гиповолемия, изменение барорефлекторной чувствительности и активация симпатического контура регуляции [11], после 5-сут СИ происходит смещение вегетативного баланса к симпатической активации [12]. В работе [13] показано, что в первые дни СИ нарушается гемодинамическая регуляция, сопровождаясь признаками эндотелиальной дисфункции.

Второй основной моделью служит антиортостатическая гипокинезия (АНОГ) – имитирующий длительную гипогравитацию постельный режим с наклоном головы -6° . АНОГ воспроизводит хронические эффекты микрогравитации [4]. По данным проектов Mars-500 и SIRIUS длительная изоляция и имитация невесомости сопровождаются изменениями вариабельности сердечного ритма и нарушением сосудистой реактивности, указывающими на усиление симпатического влияния и ослабление эндотелиального контроля [14].

Перегрузки. При перегрузках до $2g$ кожа ног демонстрирует снижение тканевой перфузии. При тех же условиях верхняя часть тела показывает уменьшение оксигенированного гемоглобина и повышение дезоксигенированной фракции, что говорит о перераспределении кровотока в микроциркуляторном звене [15]. В культурах эндотелиальных клеток гипергравитация активирует пролиферацию, факторы ангиогенеза и сигнальные пути сосудистой регуляции [16].

Вестибулярные воздействия. Вестибулярная система является одной из наиболее чувствительных к ФКП. У 60–70 % членов экипажа отмечается головокружение, тошнота, нарушение ориентации в первые 24–72 часа полета [17]. В условиях невесомости сигналы от отолитового аппарата перестают соответствовать восприятию направления гравитации, что приводит к дезориентации и формированию нового сенсомоторного шаблона [18]. В работе [19] продемонстрировано динамическое изменение микроциркуляторного кровотока по мере усиления симптомов укачивания при вращательных воздействиях на кресле Барани.

Радиация. За пределами магнитосферы Земли экипаж подвергается воздействию ионизирующих частиц высокой энергии, что вызывает эндотелиальную дисфункцию, воспаление и фиброз миокарда [20]. Космическая радиация также усиливает окислительный стресс, повреждает митохондрии и нарушает энергетический обмен, создавая предпосылки для метаболической дезадаптации [21].

Гиперкапния. Уровень CO_2 на космических станциях значительно выше земного (6–8 мм рт. ст.), что соответствует легкой хронической гиперкапнии. Повышенный CO_2 вызывает вазодилатацию сосудов мозга и рост мозгового кровотока [22].

Изоляция. Длительное пребывание в замкнутом пространстве и ограниченная коммуникация создают хронический психологический стресс. В изоляционных экспериментах фиксировали изменения вариабельности сердечного ритма, свидетельствующие о преобладании симпатической активности в периоды кризисов [23]. В условиях КП в периоды эмоционального напряжения наблюдались случаи аритмий (например, предсердные экстрасистолы) [24].

Таким образом, как реальные, так и моделируемые факторы КП оказывают комплексное влияние на организм человека, что приводит к функциональным сдвигам в работе всех систем организма. Возникающие патофизиологические и адаптационные изменения требуют тщательного мониторинга на всех уровнях организма - как органном, так и клеточном, - что позволяет выявлять индивидуальные особенности космонавтов. Основой такого персонализированного подхода может стать мониторинг МТС организма.

Материалы и методы

Для оценки физиологических параметров организма при воздействии реальных и моделируемых неблагоприятных факторов КП в области авиакосмической медицины применяются как неинвазивные методы исследования: видеокапилляроскопия, лазерная допплеровская флюоуметрия (ЛДФ), флуоресцентная спектроскопия (ФС), вариабельность сердечного ритма, электроэнцефалография, электрокардиография, ультразвуковая диагностика и др., так и методы лабораторной диагностики. В рамках развития программ длительных космических полетов активно развивается персонализированный подход к подготовке космонавтов, в основу которого заложена оценка функциональных резервов организма и индивидуальных реакций на моделируемые неблагоприятные ФКП.

Благодаря появлению на рынке медицинской техники портативных мультимодальных анализаторов, осуществляющих непрерывный мониторинг периферического кровотока и окислительного метаболизма биотканей, а также передачу данных по беспроводным каналам связи, стало возможным проведение длительного мониторинга МТС во время функциональных тестов различной сложности и продолжительности, в частности - в процессе подготовки космонавтов к полетам при воздействии моделируемых ФКП. Так для мониторинга параметров МТС использовались портативные мультимодальные анализаторы «ЛАЗМА ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва), реализующие методы ЛДФ для регистрации тканевой перфузии и оценки колебательной активности микрососудистого русла, ФС для регистрации эндогенной флуоресценции коферментов окислительного метаболизма (НАДН) и термометрию. В качестве источника излучения применяется одномодовый вертикально-излучающий лазер (VCSEL) с рабочей длиной волны 850 нм (канал ЛДФ) и светодиод с длиной волны эмиссии 365 нм (канал ФС) [6]. Стоит отметить, что в настоящее время на борту Российского сегмента МКС проводится целевая работа «ЛАЗМА» с применением данных мультимодальных анализаторов. Исследование направлено на изучение механизмов адаптации МТС организма человека к микрогравитации во время КП и реадаптации после КП [25]. Также данные анализаторы используются для оценки параметров МТС во время годового изоляционного эксперимента SIRIUS-23 [26].

Исследования проводились на базе Центра подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина (г. Звёздный, Московской обл.) в рамках ежегодного медицинского освидетельствования космонавтов при участии действующих космонавтов Отряда Роскосмоса. Для моделирования отдельных неблагоприятных ФКП применяются испытательные стенды Центра подготовки космонавтов, а именно барокамера низкого давления СБК-80, центрифуги длинного (ЦФ-18, радиус плеча вращения центрифуги 18 м) и среднего (ЦФ-7, радиус плеча вращения центрифуги 7 м) радиуса, ортостатический стол с электроприводом с углом вращения от -30° до $+70^\circ$, а также вестибулярный стенд – вращающее кресло (скорость вращения $180^\circ/\text{с}$).

На рисунке 1 представлен обобщенный вид алгоритма мониторинга параметров МТС организма космонавтов при воздействии отдельных неблагоприятных моделируемых ФКП для оценки функциональных резервов организма.

Алгоритм работает следующим образом. На теле испытуемого фиксируются портативные мультимодальные анализаторы «ЛАЗМА ПФ», симметрично справа и слева, в области бассейнов надглазничных артерий, на внутренней поверхности верхней трети голеней, а также на ладонной поверхности дистальной фаланги третьего пальца левой руки и на тыльной стороне левого запястья. После чего осуществляется непрерывная регистрация параметров МТС в течение 8 мин до и после воздействия моделируемого фактора КП, а также

непосредственно все время воздействия таких ФКП, как вестибулярные нагрузки, гипоксия и гипобария, ортостатические воздействия и перегрузки.

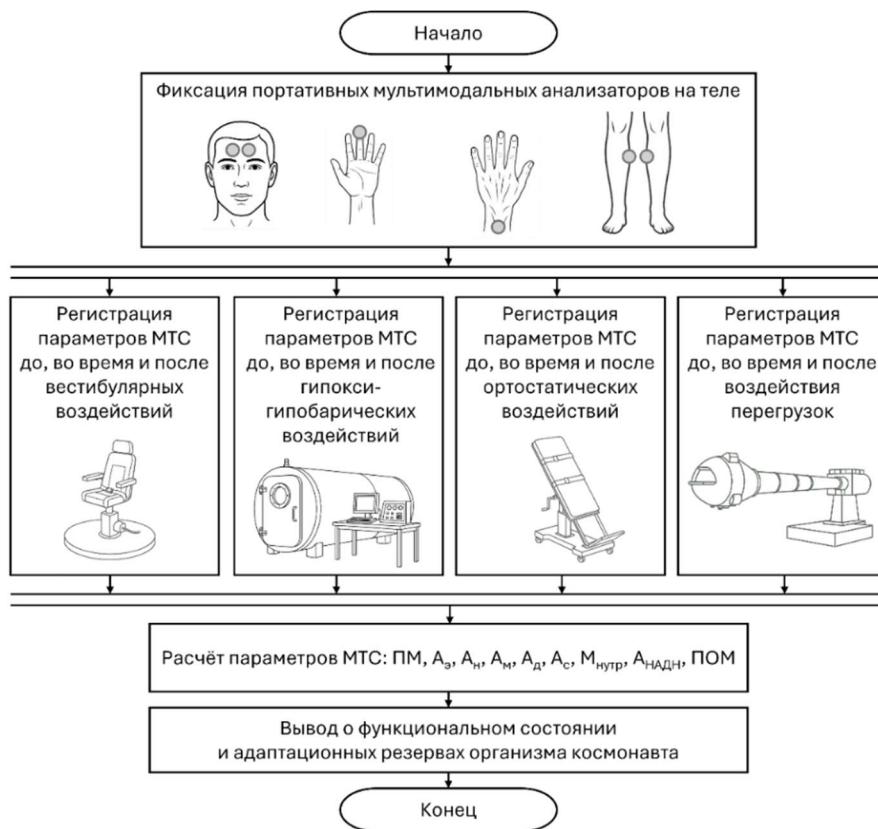


Рисунок 1 – Обобщенный алгоритм мониторинга параметров МТС организма космонавтов при воздействии отдельных неблагоприятных моделируемых ФКП для оценки функциональных резервов организма

На основе полученных данных о МТС для каждого этапа исследования производится расчет средней перфузии (ПМ), амплитуд колебаний кровотока эндотелиального (A_3), нейрогенного (A_h), миогенного (A_m), дыхательного (A_d) и сердечного (A_c) генеза, нутритивного кровотока ($M_{нутр}$), нормированной амплитуды флуоресценции НАДН (Анадн) и показателя окислительного метаболизма (ПОМ). На основании данных параметров делается вывод о функциональном состоянии организма и его адаптационных резервах.

Результаты

Моделируемые гипоксия и гипобария при «подъёме» на высоту 5 км в барокамере приводят к активации компенсаторных механизмов со стороны периферического кровообращения у 8 космонавтов мужского пола, принявших участие в исследовании. На рисунке 2 представлен типовой пример зарегистрированной динамики тканевой перфузии в области кожи лба в течение всего исследования. Во время экспозиции на «высоте» происходит активация миогенного механизма регуляции, то есть увеличивается число функционирующих капилляров для дополнительного обеспечения биотканей кислородом в условиях гипоксии. Также после окончания воздействия наблюдается активация колебаний кровотока, относящихся к холинергическому поддиапазону, что говорит о возникновении центра возбуждения в стволе мозга, характерного для расслабления организма.

На рисунке 3 представлены результаты оценки изменений параметров МТС до и после «подъёма» на высоту 5 км. В области лба после «подъёма» сохраняется повышение тканевой перфузии на 3,5–59,8% от исходного уровня справа и на 26,6–84,3% слева. Такой высокий разброс обусловлен индивидуальными особенностями организма, а именно степенью натренированности к снижению содержания кислорода во вдыхаемом воздухе. Данный результат подтверждается увеличением шунтового кровотока после окончания воздействия

гипоксии и «спуска», которое также наблюдается в широком диапазоне - $66\pm52\%$. Кроме того, после «спуска» отмечается уменьшение АНАДН, то есть происходит активное окисление НАДН, что свидетельствует об активации метаболической активности [27]. Также после «спуска» наблюдается снижение амплитуд нейрогенных и миогенных колебаний, что может быть свидетельством вазоконстрикции на этапе после воздействия гипоксии в результате возвращения к нормальному содержанию кислорода (21%) во вдыхаемом воздухе.

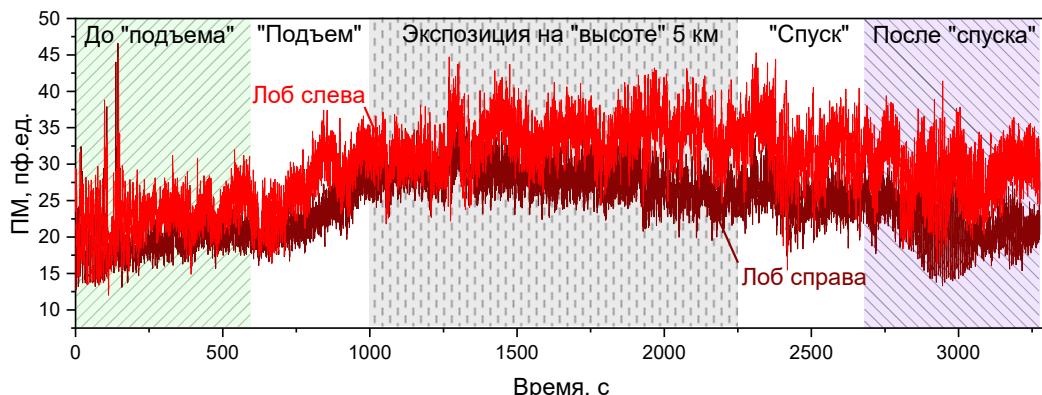


Рисунок 2 – Типовой пример зарегистрированной ЛДГ-граммы в области правого и левого бассейна надглазничной артерии при моделируемом подъеме на высоту 5 км

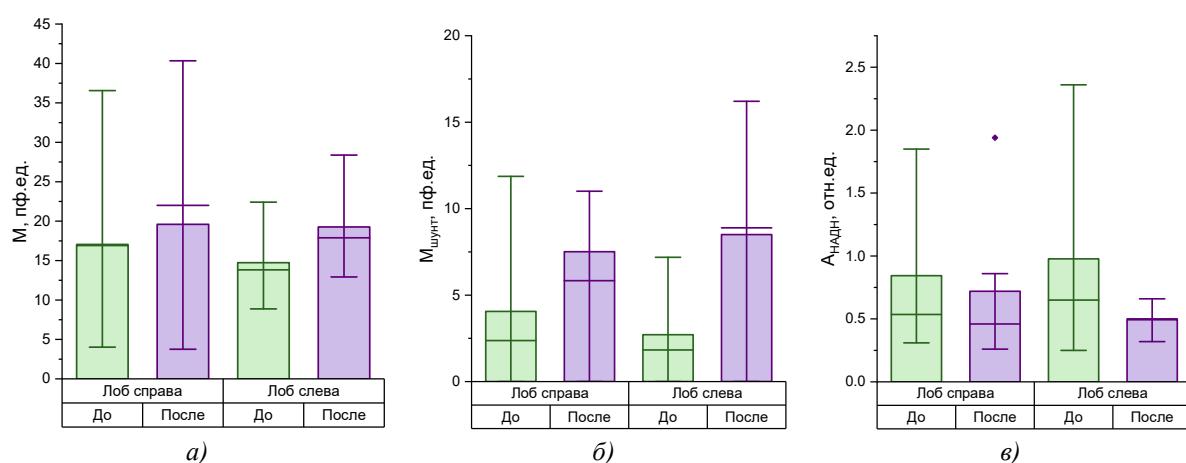


Рисунок 3 – Динамика изменения параметров МТС до и после моделируемого подъема на высоту 5 км в области кожи лба: показатель микроциркуляции крови (а), шунтовая составляющая кровотока (б), нормированная амплитуда флуоресценции НАДН (в), амплитуды нейрогенных (г) и миогенных (д) колебаний кровотока

Полученные результаты демонстрируют активацию компенсаторных механизмов регуляции окислительного метаболизма биотканей и периферического кровотока в ответ на возникающую гипоксию при моделируемом подъеме на высоту 5 км. Непрерывный мониторинг параметров МТС при гипоксии и гипобарии, а также при других моделируемых ФКП позволит не только оценить индивидуальные реакции каждого испытуемого, но и сформировать персональные критерии функциональных резервов организма космонавта, повысив тем самым безопасность и эффективность подготовки к КП.

Заключение

В настоящее время перспективным в области как клинической практики, так и экстремальной физиологии является персонализированный подход к оценке состояния организма человека. В основе такого подхода заложена оценка функционального состояния связующего звена систем доставки питательных веществ и их утилизации, а именно МТС.

Применение портативных мультимодальных анализаторов в виде распределенной системы позволяет реализовать непрерывный мониторинг МТС с учетом регионарных особенностей, обеспечив получение комплексной информации о периферическом кровотоке

и окислительном метаболизме биоткани во время воздействия моделируемых ФКП. Проведённое исследование показало, что гипоксия и гипобария приводят к активации компенсаторных и адаптационных механизмов организма при участии МТС как во время воздействия ФКП, так и после него.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют высокий потенциал применения технологий мультимодального мониторинга в портативном варианте исполнения для оценки функциональных резервов организма космонавтов, а также для совершенствования индивидуальных программ подготовки к КП и реабилитации после их завершения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-25-00546, <https://rscf.ru/project/25-25-00546/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shen, M. Effects of Spaceflight on Cardiovascular Physiology and Health / M. Shen, W.H. Frishman // Cardiology in Review. – 2019. – Vol. 27(3). – P. 122-126.
2. Baevsky, R.M. Assessment of individual adaptation to microgravity during long term space flight based on stepwise discriminant analysis of heart rate variability parameters / R.M. Baevsky, A.G. Chernikova, I.I. Funtova, J. Tank // Acta Astronautica. – 2011. – Vol. 69(11-12). – P. 1148-1152.
3. Баевский, Р.М. Некоторые особенности адаптации сердечно-сосудистой системы к длительному и безопасному пребыванию в невесомости / Р.М. Баевский, И.И. Фунтова, Е.С. Лучицкая // Пилотируемые полеты в космос. – 2019. – № 3(32). – С. 68-77.
4. Amirova, L. Cardiovascular System Under Simulated Weightlessness: Head-Down Bed Rest vs. Dry Immersion / L. Amirova, N. Navasiolava, I. Rukavishnikov [et al.] // Frontiers in Physiology. – 2020. – Vol. 11. – P. 395.
5. Дунаев, А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: монография / А.В. Дунаев. – ТНТ. – Старый Оскол, 2022. – 440 с.
6. Dunaev, A. Wearable Devices for Multimodal Optical Diagnostics of Microcirculatory-Tissue Systems: Application Experience in the Clinic and Space / A. Dunaev // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2023. – Vol. 9(2). – P. 020201.
7. Baran, R. The Cardiovascular System in Space: Focus on In Vivo and In Vitro Studies / R. Baran, S. Marchal, S. Garcia Campos [et al.] // Biomedicines. – 2021. – Vol. 10(1). – P. 59..
8. Evans, J.M. Artificial Gravity as a Countermeasure to the Cardiovascular Deconditioning of Spaceflight: Gender Perspectives / J.M. Evans, C.F. Knapp, N. Goswami // Frontiers in Physiology. – 2018. – Vol. 9. – P. 716.
9. Lee, S.M.C. Arterial structure and function in the years after long-duration spaceflight / S.M.C. Lee, L.C. Ribeiro, D.S. Martin [et al.] // Journal of Applied Physiology. – 2025. – Vol. 138(6). – P. 1474-1488.
10. Stavnichuk, M. A systematic review and meta-analysis of bone loss in space travelers / M. Stavnichuk, N. Mikolajewicz, T. Corlett [et al.] // npj Microgravity. – 2020. – Vol. 6(1). – P. 13.
11. Tomilovskaya, E. Dry Immersion as a Ground-Based Model of Microgravity Physiological Effects / E. Tomilovskaya, T. Shigueva, D. Sayenko [et al.] // Frontiers in Physiology. – 2019. – Vol. 10. – P. 284.
12. Rusanov, V.B. The Effect of Five-Day Dry Immersion on the Nervous and Metabolic Mechanisms of the Circulatory System / V.B. Rusanov, L.K. Pastushkova, I.M. Larina [et al.] // Frontiers in Physiology. – 2020. – Vol. 11. – P. 692.
13. Попова, Ю.А. Биомеханика и регуляция внешнего дыхания в условиях 5-суточной иммерсии / Ю.А. Попова, А.В. Суворов, А.И. Дьяченко, В.И. Колесников // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2011. – Т. 45(6). – С. 26-31.
14. Bimpont-Buta, N.-Y. Comprehensive Analysis of Macrocirculation and Microcirculation in Microgravity During Parabolic Flights / N.-Y. Bimpont-Buta, J.M. Muessig, T. Knost [et al.] // Frontiers in Physiology. – 2020. – Vol. 11. – P. 960.
15. Habazettl, H. Microvascular responses to (hyper-)gravitational stress by short-arm human centrifuge: arteriolar vasoconstriction and venous pooling / H. Habazettl, A. Stahn, A. Nitsche [et al.] // European Journal of Applied Physiology. – 2016. – Vol. 116(1). – P. 57-65.
16. De Cesari, C. Hypergravity Activates a Pro-Angiogenic Homeostatic Response by Human Capillary Endothelial Cells / C. De Cesari, I. Barravecchia, O.V. Pyankova [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. – 2020. – Vol. 21(7). – P. 2354.
17. Russomano, T. Space motion sickness: A common neurovestibular dysfunction in microgravity / T. Russomano, M. Da Rosa, M. Dos Santos // Neurology India. – 2019. – Vol. 67(8). – P. 214.
18. Carriot, J. Challenges to the Vestibular System in Space: How the Brain Responds and Adapts to Microgravity / J. Carriot, I. Mackrour, K.E. Cullen // Frontiers in Neural Circuits. – 2021. – Vol. 15. – P. 760313.
19. Kolev, O. I. Responses in Skin Microcirculation to Vestibular Stimulation Before and During Motion Sickness / O.I. Kolev, C. Möller, G. Nilsson, L. Tibbling // Canadian Journal of Neurological Sciences / Journal Canadien des Sciences Neurologiques. – 1997. – Vol. 24(1). – P. 53-57.
20. Boerma, M. Space radiation and cardiovascular disease risk / M. Boerma, G.A. Nelson, V. Sridharan [et al.] // World Journal of Cardiology. – 2015. – Vol. 7(12). – P. 882-888.

21. Mircea, A.A. Space Travel: The Radiation and Microgravity Effects on the Cardiovascular System / A.A. Mircea, D.V. Pistritu, A. Fortner [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. – 2024. – Vol. 25(21). – P. 11812.
22. Almanza-Hurtado, A. Hypercapnia from Physiology to Practice / A. Almanza-Hurtado, C. Polanco Guerra, M.C. Martínez-Ávila [et al.] // International Journal of Clinical Practice. – 2022. – Vol. 2022(1). – P. 2635616.
23. Solcova, I. Locus of control, stress resistance, and personal growth of participants in the Mars-500 experiment / I. Solcova, A. G. Vinokhodova // Human Physiology. – 2015. – Vol. 41(7). – P. 761-766.
24. Anzai, T. Cardiac arrhythmias during long-duration spaceflights / T. Anzai, M.A. Frey, A. Nogami // Journal of Arrhythmia. – 2014. – Vol. 30(3). – P. 139-149.
25. Дунаев, А.В. Исследование микроциркуляции крови в условиях невесомости с помощью портативных лазерных доплеровских флюоуметров / А.В. Дунаев, Ю.И. Локтионова, Е.В. Жарких [и др.] // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2024. – Т. 58(1). – С. 47-54.
26. Пашкова, Д.В. Нейровегетативная регуляция сердечного ритма и функциональное состояние микроциркуляторного русла в условиях 12-месячного изоляционного эксперимента / Д.В. Пашкова, О.В. Попова, Ю.А. Попова [и др.] // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2025. – Т. 59(5). – С. 59-69.
27. Дунаев, А.В. Возможности флуоресцентной спектроскопии биотканей человека в портативном мультимодальном исполнении / А.В. Дунаев, В.С. Янушин, Ю.И. Локтионова, Е.В. Жарких // Современные технологии в медицине. – 2025. – Т. 17(3). – С. 29-40.

Локтионова Юлия Игоревна

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел

Аспирант кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, стажер-исследователь

научно-технологического центра биомедицинской фотоники

302020, г. Орел, Наугорское ш, 29

E-mail: yu.loktionova@oreluniver.ru

LOKTIONOVA Y.I.

SPACE FLIGHT FACTORS: IMPACT EFFECTS ON THE HUMAN BODY AND RESEARCH METHODS

Annotation. The work is devoted to the influence of simulated space flight (SF) factors on the parameters of the microcirculatory-tissue systems (MTS) of the human body. The real and simulated SF factors and the physiological effects of the human body caused by them are described. A comprehensive approach to monitoring the functional state of the body during the preparation of an cosmonaut for flight is substantiated. The developed algorithm for monitoring MTS parameters using a distributed system of multimodal analyzers of blood microcirculation and oxidative metabolism of biological tissue under the influence of individual simulated SF factors is demonstrated. The role of MTS in maintaining homeostasis in conditions of hypoxia and hypobaria is shown. The results obtained can become the basis of a personalized approach to cosmonaut training based on criteria for assessing the functional reserves and adaptive potential of the body.

Keywords: laser Doppler flowmetry, fluorescence spectroscopy, portable multimodal analyzers, microcirculatory-tissue systems, space flight factors.

BIBLIOGRAPHY

1. Shen, M. Effects of Spaceflight on Cardiovascular Physiology and Health / M. Shen, W.H. Frishman // Cardiology in Review. – 2019. – Vol. 27(3). – P. 122-126.
2. Baevsky, R.M. Assessment of individual adaptation to microgravity during long term space flight based on stepwise discriminant analysis of heart rate variability parameters / R.M. Baevsky, A.G. Chernikova, I.I. Funtova, J. Tank // Acta Astronautica. – 2011. – Vol. 69(11-12). – P. 1148-1152.
3. Baevsky, R.M. Some features of the cardiovascular system adaptation to long-term and safe stay in weightlessness / R.M. Baevsky, I.I. Funtova, E.S. Luchitskaya // Piloted Space Flights (Manned Spaceflight). – 2019. – No. 3(32). – P. 68-77.
4. Amirova, L. Cardiovascular System Under Simulated Weightlessness: Head-Down Bed Rest vs. Dry Immersion / L. Amirova, N. Navasiolava, I. Rukavishnikov [et al.] // Frontiers in Physiology. – 2020. – Vol. 11. – P. 395.
5. Dunaev, A.V. Multimodal optical diagnostics of human microcirculatory-tissue systems: monograph / A.V. Dunaev. – TNT. – Stary Oskol, 2022. – 440 p.
6. Dunaev, A. Wearable Devices for Multimodal Optical Diagnostics of Microcirculatory-Tissue Systems: Application Experience in the Clinic and Space / A. Dunaev // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2023. – Vol. 9(2). – P. 020201.
7. Baran, R. The Cardiovascular System in Space: Focus on In Vivo and In Vitro Studies / R. Baran, S. Marchal, S. Garcia Campos [et al.] // Biomedicines. – 2021. – Vol. 10(1). – P. 59..
8. Evans, J.M. Artificial Gravity as a Countermeasure to the Cardiovascular Deconditioning of Spaceflight: Gender Perspectives / J.M. Evans, C.F. Knapp, N. Goswami // Frontiers in Physiology. – 2018. – Vol. 9. – P. 716.

9. Lee, S.M.C. Arterial structure and function in the years after long-duration spaceflight / S.M.C. Lee, L.C. Ribeiro, D.S. Martin [et al.] // Journal of Applied Physiology. – 2025. – Vol. 138(6). – P. 1474-1488.
10. Stavnichuk, M. A systematic review and meta-analysis of bone loss in space travelers / M. Stavnichuk, N. Mikolajewicz, T. Corlett [et al.] // npj Microgravity. – 2020. – Vol. 6(1). – P. 13.
11. Tomilovskaya, E. Dry Immersion as a Ground-Based Model of Microgravity Physiological Effects / E. Tomilovskaya, T. Shigueva, D. Sayenko [et al.] // Frontiers in Physiology. – 2019. – Vol. 10. – P. 284.
12. Rusanov, V.B. The Effect of Five-Day Dry Immersion on the Nervous and Metabolic Mechanisms of the Circulatory System / V.B. Rusanov, L.K. Pastushkova, I.M. Larina [et al.] // Frontiers in Physiology. – 2020. – Vol. 11. – P. 692.
13. Popova, Y.A. Biomechanics and regulation of the external respiration in the conditions of 5-day dry immersion / Y.A. Popova, A.V. Suvorov, A.I. Diachenko, V.I. Kolesnikov // Aerospace and Environmental Medicine. – 2011. – Vol. 45(6). – P. 26-31.
14. Bimpont-Buta, N.-Y. Comprehensive Analysis of Macrocirculation and Microcirculation in Microgravity During Parabolic Flights / N.-Y. Bimpont-Buta, J.M. Muessig, T. Knost [et al.] // Frontiers in Physiology. – 2020. – Vol. 11. – P. 960.
15. Habazettl, H. Microvascular responses to (hyper-)gravitational stress by short-arm human centrifuge: arteriolar vasoconstriction and venous pooling / H. Habazettl, A. Stahn, A. Nitsche [et al.] // European Journal of Applied Physiology. – 2016. – Vol. 116(1). – P. 57-65.
16. De Cesari, C. Hypergravity Activates a Pro-Angiogenic Homeostatic Response by Human Capillary Endothelial Cells / C. De Cesari, I. Barravecchia, O.V. Pyankova [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. – 2020. – Vol. 21(7). – P. 2354.
17. Russomano, T. Space motion sickness: A common neurovestibular dysfunction in microgravity / T. Russomano, M. Da Rosa, M. Dos Santos // Neurology India. – 2019. – Vol. 67(8). – P. 214.
18. Carriot, J. Challenges to the Vestibular System in Space: How the Brain Responds and Adapts to Microgravity / J. Carriot, I. Mackrour, K.E. Cullen // Frontiers in Neural Circuits. – 2021. – Vol. 15. – P. 760313.
19. Kolev, O. I. Responses in Skin Microcirculation to Vestibular Stimulation Before and During Motion Sickness / O.I. Kolev, C. Möller, G. Nilsson, L. Tibbling // Canadian Journal of Neurological Sciences / Journal Canadien des Sciences Neurologiques. – 1997. – Vol. 24(1). – P. 53-57.
20. Boerma, M. Space radiation and cardiovascular disease risk / M. Boerma, G.A. Nelson, V. Sridharan [et al.] // World Journal of Cardiology. – 2015. – Vol. 7(12). – P. 882-888.
21. Mircea, A.A. Space Travel: The Radiation and Microgravity Effects on the Cardiovascular System / A.A. Mircea, D.V. Pistritu, A. Fortner [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. – 2024. – Vol. 25(21). – P. 11812.
22. Almanza-Hurtado, A. Hypercapnia from Physiology to Practice / A. Almanza-Hurtado, C. Polanco Guerra, M.C. Martínez-Ávila [et al.] // International Journal of Clinical Practice. – 2022. – Vol. 2022(1). – P. 2635616.
23. Solcova, I. Locus of control, stress resistance, and personal growth of participants in the Mars-500 experiment / I. Solcova, A. G. Vinokhodova // Human Physiology. – 2015. – Vol. 41(7). – P. 761-766.
24. Anzai, T. Cardiac arrhythmias during long-duration spaceflights / T. Anzai, M.A. Frey, A. Nogami // Journal of Arrhythmia. – 2014. – Vol. 30(3). – P. 139-149.
25. Dunaev, A.V. Investigation of blood microcirculation in microgravity with the use of portable laser Doppler flowmeters / A.V. Dunaev, Y.I. Loktionova, E.V. Zharkikh [et al.] // Aerospace and Environmental Medicine. – 2024. – Vol. 58(1). – P. 47-54.
26. Pashkova, D.V. Neurovegetative regulation of the cardiac rhythm and functional condition of microcirculation vessels in a 12-month isolation study / D.V. Pashkova, O.V. Popova, Y.A. Popova [et al.] // Aerospace and Environmental Medicine. – 2025. – Vol. 59(5). – P. 59-69.
27. Dunaev, A. Capabilities of Human Biotissue Fluorescence Spectroscopy in the Wearable Multimodal Version / A. Dunaev, V. Yanushin, Y. Loktionova, E. Zharkikh // Sovremennye tehnologii v medicine. – 2025. – Vol. 17(3). – P. 29-38.

Loktionova Yulia Igorevna

Orel State University,

Postgraduate Student of the Department of Instrumentation, Metrology and Certification, research assistant of Research & Development Center of Biomedical Photonics

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: yu.loktonova@oreluniver.ru

© Локтионова Ю.И., 2025

СЕЛИХОВ А.В., РЕВЯКИНА М.О., ЧАПЧА В.А., МЕРКУЛОВ К.А.

ВАЛИДАЦИЯ КАНАЛА ИЗМЕРЕНИЯ ЭКГ РАЗРАБОТАННОГО ПОРТАТИВНОГО КАРДИОДИАГНОСТИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ УИЛКОКСОНА

Аннотация. Данная статья посвящена рассмотрению способа валидации и получению статистически обоснованных результатов валидации измерительного канала портативного кардиодиагностического устройства, обеспечивающего измерение сигнала ЭКГ. В работе проводится сравнение временных интервалов сигнала ЭКГ (*P*-длительность, *PR*-интервал, *QRS*-длительность, *QT*-интервал, *QTc*-интервал) эталонного и опытного устройства с использованием критерия знаковых рангов Уилкоксона.

Ключевые слова: машинное обучение, медицина, постановка диагноза, ЭКГ, критерий Уилкоксона.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной смертности в глобальном масштабе, ежегодно унося миллионы жизней. Особенно тревожная ситуация сложилась в России, где показатели смертности от кардиологических патологий значительно превышают среднемировые значения. Среди всех причин смертей на их долю приходится 57%. Каждый год на 100 тысяч граждан России умирают от инфаркта миокарда 154 женщины и вдвое больше мужчин [1, 2].

В последние годы медицинское сообщество отмечает тенденцию снижения возраста больных сердечно-сосудистыми заболеваниями [3]. Также кардиологи диагностируют серьезные патологии у людей молодого и среднего возраста. Эта тенденция особенно ярко проявляется среди студенческой молодежи, что заставляет по-новому взглянуть на проблему профилактики сердечных заболеваний [3]. Так как их образ жизни часто характеризуется высокими нагрузками, стрессом и нерегулярным питанием – факторами, прямо влияющими на состояние сердечно-сосудистой системы [4].

Сердечно-сосудистая система – это сложный объект для контроля, состояние которого невозможно полноценно охарактеризовать по одному-двум диагностическим параметрам из-за большого количества взаимосвязанных процессов в организме человека. Например, изолированно взятый сигнал ЭКГ может не выявить ранних признаков вегетативной дисфункции, которые проявляются лишь в синхронном анализе вариабельности сердечного ритма (ВСР), артериального давления и данных фонокардиографии.

Существующие портативные решения не обеспечивают комплексного сбора и интегрального анализа разнородных физиологических данных, актуальность разработанного устройства обусловлена необходимостью создания диагностического устройства, принципиальным отличием которого является комплексность проводимой оценки. Одновременная регистрация и последующий синхронный анализ ЭКГ, фонокардиограммы, миограммы, артериального давления, сатурации и температуры позволяют строить многопараметрическую модель состояния пациента. Такой подход создает дополнительную информационную ценность, что в перспективе, при использовании алгоритмов машинного обучения, позволяет: повысить достоверность диагностики за счет взаимной верификации данных по разным каналам; выявлять слабые, многопараметрические корреляции, не очевидные при анализе сигналов по отдельности; перейти от констатации отдельных нарушений к комплексной оценке функционального состояния сердечно-сосудистой системы.

Для реализации данного подхода разработано портативное кардиодиагностическое устройство. При этом, разработка техники проходит несколько этапов, вначале проводится эскизное проектирование, в результате выполнения данного этапа изготовлен материальный макет устройства (ГОСТ 2.103 2013). Макет предназначен для проверки применённых в ходе разработки решений, анализ работоспособности, проверки полученных данных. Анализ достоверности полученных данных возможен путём сравнения результатов, полученных с

помощью эталонного прибора и опытного. Основным источником информации для разработанного устройства является сигнал ЭКГ, поэтому целью работы является рассмотрение способа валидации и получения статистически обоснованных результатов валидации измерительного канала портативного кардиодиагностического устройства, обеспечивающего измерение сигнала ЭКГ.

Основная часть

На рисунке 1 представлена структурная схема портативного кардиодиагностического устройства, предназначенного для сбора диагностической информации: сигнал ЭКГ, сигнал миографии, сигнал фонокардиографии, сатурация, артериальное давление, температура. Совместная обработка данных позволит повысить эффективность диагностирования за счет получения дополнительной информации.

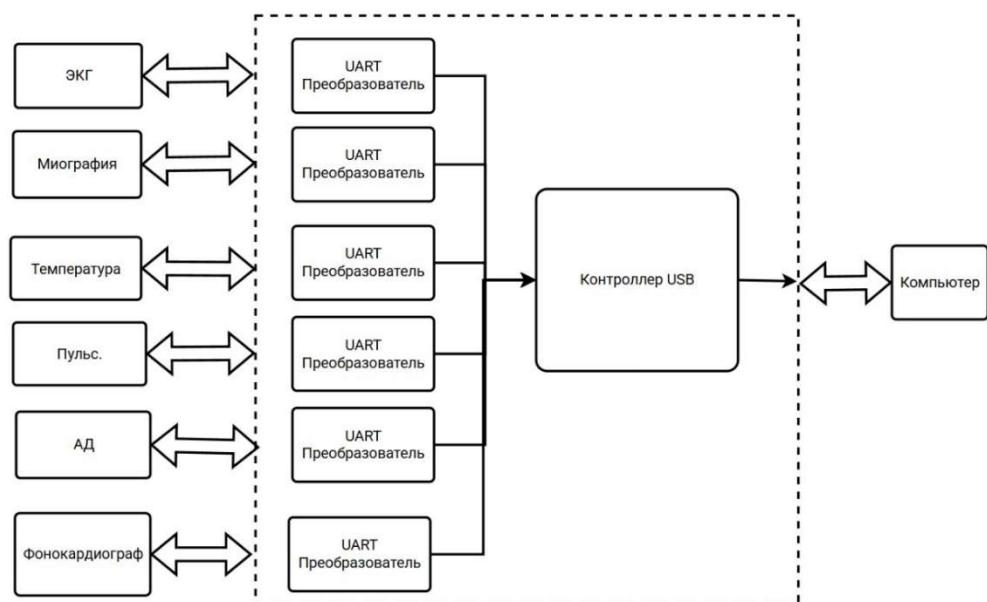


Рисунок 1 – Схема структурная информационно-измерительного устройства

На рисунке 2 представлен опытный образец устройства.

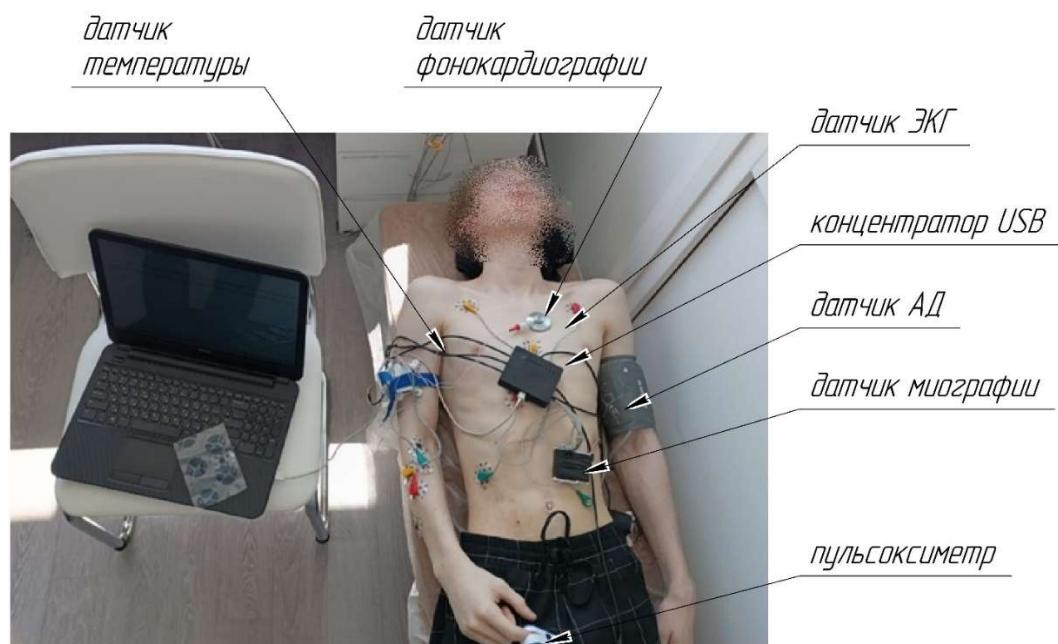


Рисунок 2 – Опытный образец разработанного устройства

Для валидации канала измерения ЭКГ разработанного устройства был проведен эксперимент по сравнению его показаний с данными, полученными с помощью сертифицированного электрокардиографа Medinova ECG-9803, принятого в качестве образцового средства измерения, так как на стадии эскизного проектирования данный подход позволяет сократить финансовые затраты на анализ работоспособности макета. Выбор данного прибора обусловлен его разрешением к применению в медицинской практике, что позволяет считать его данные в качестве образцового для целей сравнения. Цель валидации в доказательстве того, что разработанный комплекс обеспечивает сопоставимую с клиническим оборудованием точность измерения параметров сигнала ЭКГ.

В качестве сравниваемых параметров были выбраны интервалы: P -длительность, PR -интервал, QRS -длительность, QT -интервал, QTc -интервал, так как анализируется точность определения временных интервалов (рисунок 3) [5]. Q и S точки определяются как окрестности R -пиков, интервал QTc вычисляется по формуле [6]:

$$QTc = QT / \sqrt{RR},$$

где QT – длительность QT -интервала, mc .

RR – расстояние между комплексом QRS с номером i и с номером $i+1$, c .

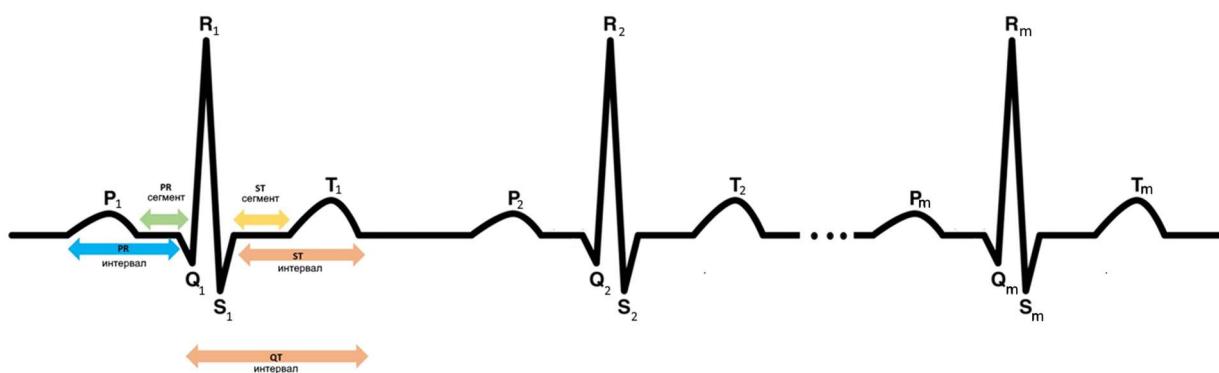


Рисунок 3 – Параметры PQRST-комплекса

Обследовалась группа: мужской пол, возраст от 19 до 25 лет, выборка $n=28$ человек.

Длительность реализации сигнала ЭКГ составляет 3 s из-за технических ограничений электрокардиографа Medinova ECG-9803. За это время может быть m биений сердца, временные интервалы варьируются, так как их длительность зависит от физиологических процессов организма, поэтому для анализа были определены интервалы каждого $PQRST$ -комплекса для 28 пациентов для всей реализации ЭКГ и усреднены по n . В ходе проведения эксперимента получены измерения X_k эталонного оборудования и измерения Y_k опытного для каждого пациента (k – номер параметра, который принимает значение: $k=1$ для P -длительности, $k=2$ для PR -интервала, $k=3$ для QRS -длительности, $k=4$ для QT -интервала, $k=5$ для QTc -интервала), статистические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Некоторые статистические характеристики результатов измерений

k	Интервал	Среднее (mc)		СКО (mc)		Размах (mc)	
		\bar{X}_k	\bar{Y}_k	$\sigma(X_k)$	$\sigma(Y_k)$	$w(X_k)$	$w(Y_k)$
1	P	102,9	102,4	5,2	5,8	17	22
2	PR	152,8	152,7	8,1	8,8	35	44
3	QRS	94,9	94,3	7,2	6,8	40	38
4	QT	341,4	341,6	48,9	49,2	230	234
5	QTc	365,5	366,4	27,6	28,1	122	125

Наиболее короткую длительность имеет QRS -интервал, среднее значение которого составляет 94,9 mc для эталонного прибора и 94,3 mc для опытного, наибольшую длительность имеет QTc -интервал, среднее значение которого составляет 365,5 mc для эталонного прибора и 366,4 mc для опытного. На фоне этих значений разность показаний выглядит незначительной,

но требуется убедиться в том, что отсутствует систематическая погрешность (смещение). Для этого составим пять случайных величин:

$$d_k = X_k - Y_k,$$

где X_k – результаты измерения временных интервалов $PQRST$ эталонным прибором,

Y_k – результаты измерения временных интервалов $PQRST$ опытным прибором.

Основные числовые характеристики d_k представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Некоторые статистические характеристики разности измерений

k	Интервал	Среднее	Дисперсия	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса	Медиана
		(мс)	(мс ²)	A(d _k)	E(d _k)	(мс)
1	P	0,51	10,24	-0,29	-1,45	0,94
2	PR	0,09	16,81	-0,02	-1,03	0,13
3	QRS	0,53	11,56	-0,04	-1,26	0,41
4	QT	-0,26	14,44	0,23	-1,13	-0,37
5	QTc	-0,92	16,81	0,47	-1,22	-1,79

Гистограммы распределения разностей показаний для каждого временного интервала приведены на рисунке 4 *a–d*.

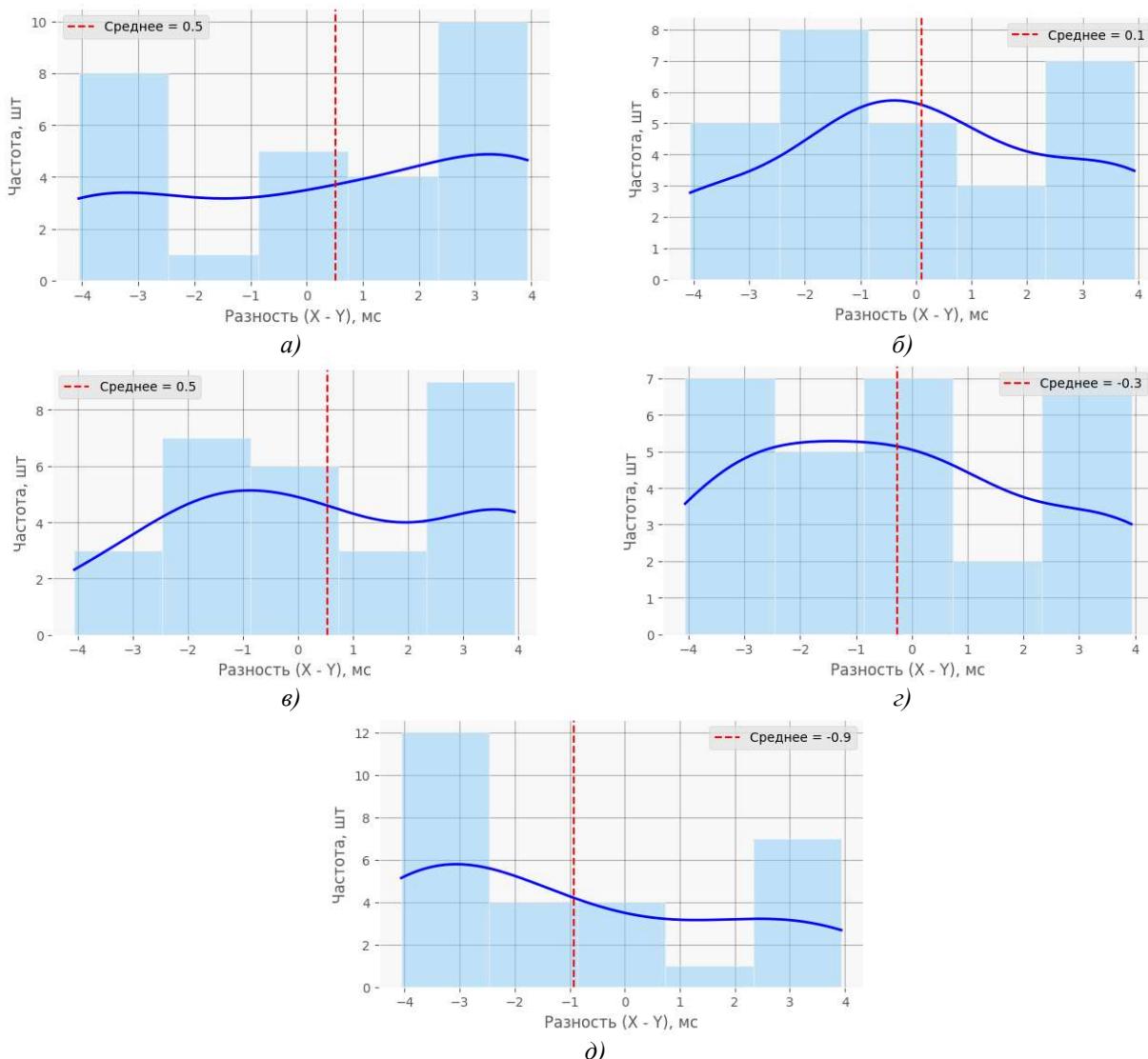


Рисунок 4 – Гистограмма распределения разностей:

a) – P-длительность, б) – PR-интервал, в) – QRS-длительность, г) – QT-интервал, д) – QTc-интервал

Основным критерием для обнаружения статистически значимого систематического смещения между парами данных является критерий Стьюдента. Важным условием для его применения является то, что закон распределения исследуемых данных должен быть нормальным [7]. Согласно таблице 2 средние значения \bar{d}_k временных интервалов, коэффициенты асимметрии $A(d_k)$, коэффициенты эксцесса $E(d_k)$, медианы $Me(d_k)$ не равны нулю, что не соответствует нормальному закону распределения.

Гистограммы распределения также не соответствуют гистограммам нормального распределения. Чтобы убедиться, что случайные величины d_k не из нормальной совокупности, проверяются нулевые гипотезы $H_{k,0}=\{d_k \text{ распределены нормально}\}$ с помощью критерия Шапиро-Уилка, который применяется так как число измерений $8 \leq n \leq 50$ (ГОСТ Р ИСО 5479-2002).

Для этого каждая из пяти выборок упорядочивается так, чтобы выполнялось условие $d_{k,(1)} \leq d_{k,(2)} \leq \dots \leq d_{k,(n)}$, и вычисляются вспомогательные величины [8, с. 27]:

$$S_k = \sum_{i=1}^n a_{k,(i)} [d_{k,(n+1-i)} - d_{k,(i)}] \quad (k=1, 2, \dots, 5),$$

где $a_{k,(i)}$ – табличные коэффициенты для параметров с номером k ;
тогда W -статистика критерия имеет вид [8, с. 27]:

$$W_k = \frac{S_k^2}{\sum_{i=1}^n (d_{k,(i)} - \bar{d}_k)^2}.$$

Результаты вычислений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты теста Шапиро-Уилка

k	1	2	3	4	5
Интервал	P	PR	QRS	QT	QTc
W -статистика	W_k	0,8364	0,9067	0,8830	0,9197
p -value	p_k	0,0005	0,0165	0,0047	0,0341
					0,0019

Критическое значение уровня значимости выберем 0,05, так как это типичное значение для технических измерений [8]. Из результатов таблицы 3 видно, что у всех временных интервалов значение $p_k < 0,05$, следовательно для каждого из пяти интервалов гипотезы $H_{k,0}$ о нормальности отклоняются, и применить критерий Стьюдента для сравнения средних нельзя. Поэтому воспользуемся непараметрическим критерием знаковых рангов Уилкоксона (Wilcoxon).

Сформулируем нулевые гипотезы для применения критерия Уилкоксона для всех пяти параметров:

$$H'_{k,0} = \{M(d_k) = 0\} \quad (k=1, 2, \dots, 5),$$

и альтернативные:

$$H'_{k,1} = \{M(d_k) \neq 0\}.$$

Гипотезы будут проверяться на том же уровне значимости 0,05. Для каждой пары измерений имеется вычисленная разность $d_{k,(i)}$, проверено наличие нулевых разностей, так как они должны быть исключены, проведено ранжирование абсолютных значений разностей $|d_{k,(i)}|$, от наименьшего к наибольшему. Каждому рангу присвоен знак соответствующей разности, для вычисления суммы рангов с положительными знаками W^+ и сумма рангов с отрицательными знаками W^- . Статистика критерия Уилкоксона для параметра с номером k [9, с. 19]:

$$T_k = \min(W_k^+, W_k^-).$$

Статистика T является нормально распределенной и математическое ожидание статистики Уилкоксона для T_k [9, с. 20]:

$$\mu(T_k) = \frac{n(n+1)}{4} = 203,$$

где n – объем анализируемой выборки, $n = 28$ пар измерений.

Стандартное отклонение [9, с. 20]:

$$\sigma(T_k) = \sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}} = 107,5.$$

Z-статистика [9, с. 20]:

$$Z_k = \frac{T_k - \mu(T_k)}{\sigma(T_k)}.$$

p -value определяется как:

$$p_k = 2 \cdot [1 - \Phi(|Z_k|)].$$

где $\Phi(|Z_k|)$ – функция стандартного нормального распределения, так как в критерии Уилкоксона она используется для аппроксимации распределения статистики Z [10].

Результаты вычислений представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты анализа

k	1	2	3	4	5
Интервал	P	PR	QRS	QT	QTc
T -статистика	T_k	191	191	179	171
Z -статистика	Z_k	-0,273	-0,273	-0,547	-0,729
p -value	p_k	0,784	0,784	0,584	0,466
					0,053

По результатам таблицы 4, так как все $p_k > 0,05$, то гипотезы $H'_{k,0}$ принимаются, т.е. отличия от нуля математических ожиданий разностей d_k для всех параметров могут быть признаны незначимыми, а значит, различия между показаниями эталонного и опытного приборов статистически несущественны.

Заключение

Проблема диагностики сердечно-сосудистой системы является актуальной для Российской Федерации. Так как ключевым диагностическим сигналом является ЭКГ, была проведена валидация разработанного канала устройства, предназначенного для измерения ЭКГ, путем сравнения показаний с сертифицированным электрокардиографом.

Анализ распределения разностей с помощью критерия Шапиро-Уилка выявил отклонение от нормального закона, так как для всех временных интервалов P , PR , QRS , QT , QTc значение $p_k < 0,05$. С помощью критерия Уилкоксона определено, что различия между показаниями эталонного и опытного приборов статистически несущественны для всех временных интервалов, и разработанный канал устройства для измерения ЭКГ может быть рекомендован для мониторинга состояния здоровья.

Математическая обработка данных, представленных в работе, проводилась с применением библиотек Python.

Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания №075-00195-25-05 от 30.05.2025г. на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов, проект № FSGN-2024-0007 (1023110800218-7-3.2.4;3.1.3;2.6.1)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Каприн А.Д., Александрова Л.М., Старинский В.В. Медико-социальные аспекты формирования в России концепции здорового образа жизни // РМЖ. – 2017. - № 14. - Т. 25. – С. 995-999.
- Якшина Алиса Дмитриевна. Сердечно-сосудистые заболевания в России: обзор статистики // Наука через призму времени.-2024.-№1 (82.. – С. 61-63.
- Климук, М. И. Факторы риска развития атеросклероза у студентов ГБПОУ «Кудымкарское медицинское училище» / М. И. Климук, М. С. Невзорова, О. А. Ермакова // Молодой ученый. 2019. № 4 (242.. С. 120–124.

4. Влияние лечебной физической культуры на адаптированность сердечно-сосудистой системы к физической нагрузке / В. С. Кругликова, Л. Ю. Десяткина, Е. В. Тулкубаева, А. М. Баранова // Актуальные проблемы физической культуры, спорта и туризма ;, Материалы XI международной научно-практической конференции, г. Уфа, 23–25 марта 2017 года. Уфа, 2017. С. 355–358.
5. Методы определения элементов PQRST-комплекса электрокардиограммы / О. А. Машкова, В. В. Шакlein, Ю. В. Маркин [и др.] // Труды Института системного программирования РАН. – 2022. – Т. 34, № 4. – С. 229–240.
6. В. Н. Комолятова, Т. С. Шаблинова, Д. В. Дроздов, И. Е. Карпова, И. Л. Козловская, Л. М. Макаров Интервал QT на электрокардиограмме покоя: значение и методы измерения // Вестник аритмологии. 2024. №2 (116.. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/interval-qt-na-elektrokardiogramme-pokoya-znachenie-i-metody-izmereniya> (дата обращения: 26.10.2025..
7. Прямое сравнение диагностической эффективности радиофармацевтических препаратов на основе альтернативных каркасных протеинов $[99m\text{Tc}]\text{Tc}$ -ADAPT6 и $[99m\text{Tc}]\text{Tc}$ -(HE.3-G3 у больных HER2-позитивным раком молочной железы / О. Д. Брагина, С. М. Деев, Е. Ю. Гарбуков [и др.] // Бюллетень сибирской медицины. – 2023. – Т. 22, № 3. – С. 6–13.
8. Лемешко Б. Ю. Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона. Руководство по применению / Б.Ю. Лемешко. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2014. – 192 с.
9. Гублер Е.В., Генкин А.А. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. М., 1973.
10. Холлендер М., Вулф Д. Непараметрические методы статистики. - М.: Финансы и статистика, 1983. – 518 с.

Селихов Алексей Владимирович

ФГБОУ ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел
к.т.н., доцент кафедры приборостроения, метрологии
и сертификации
ул. Комсомольская, д. 95, Орловская область, г. Орел,
302026
+79004841497
Selihov.ostu@yandex.ru

Ревякина Мария Олеговна

ФГБОУ ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел
к.м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории
молекулярной, трансляционной и цифровой
кардиоиммунологии
ул. Комсомольская, д. 95, Орловская область, г. Орел,
302026
+79200896990
moplotnikova@mail.ru

Чапча Вячеслав Андреевич

ФГБОУ ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел
студент кафедры электроники, радиотехники и систем
связи
ул. Комсомольская, д. 95, Орловская область, г. Орел,
302026
+79536277424
eriss603@yandex.ru

Меркулов Кирилл Алексеевич

ФГБОУ ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел
студент кафедры электроники, радиотехники и систем
связи
ул. Комсомольская, д. 95, Орловская область, г. Орел,
302026
+79534776560
eriss603@yandex.ru

SELIKHOV A.V., REVYAKINA M.O., CHAPCHA V.A., MERKULOV K.A.

**VALIDATION OF THE ECG MEASUREMENT CHANNEL
OF THE DEVELOPED PORTABLE CARDIAC DIAGNOSTIC DEVICE
USING THE WILCOXON CRITERION**

Abstract. This article examines a method for validating and obtaining statistically valid results for the measurement channel of a portable cardiac diagnostic device that measures ECG signals. The paper compares the ECG signal time intervals (P-duration, PR-interval, QRS-duration, QT-interval, QTc-interval) of a reference and experimental device using the Wilcoxon signed-rank test.

Keywords: machine learning, medicine, diagnosis, ECG, Wilcoxon test.

BIBLIOGRAPHY

1. Kaprin A.D., Aleksandrova L.M., Starinsky V.V. Medical and social aspects of the formation of a healthy lifestyle concept in Russia // RMZh. - 2017. - No. 14. - Vol. 25. - P. 995-999.
2. Yakshina Alisa Dmitrievna. Cardiovascular diseases in Russia: a statistical review // Science through the prism of time.-2024.-№ 1 (82.. - P. 61-63.
3. Klimuk, M.I. Risk factors for the development of atherosclerosis in students of GBPOU "Kudymkar Medical School" / M.I. Klimuk, M.S. Nevzorova, O.A. Ermakova // Young scientist. 2019. No. 4 (242.. P. 120-124.

4. The Impact of Physical Therapy on the Adaptation of the Cardiovascular System to Physical Activity / V. S. Kruglikova, L. Yu. Desyatkina, E. V. Tulkubaeva, A. M. Baranova // Current Issues of Physical Culture, Sports and Tourism: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference, Ufa, March 23–25, 2017. Ufa, 2017. pp. 355–358.
5. Methods for Determining Elements of the PQRST Complex of an Electrocardiogram / O. A. Mashkova, V. V. Shaklein, Yu. V. Markin [et al.] // Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences. – 2022. – Vol. 34, No. 4. – pp. 229–240.
6. V. N. Komolyatova, T. S. Shablinova, D. V. Drozdov, I. E. Karpova, I. L. Kozlovskaya, L. M. Makarov QT interval on a resting electrocardiogram: meaning and measurement methods // Bulletin of Arrhythmology. 2024. No. 2 (116.. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/interval-qt-na-elektrokardiogramme-pokoya-znachenie-i-metody-izmereniya> (date of access: 10/26/2025..
7. Direct comparison of the diagnostic efficacy of radiopharmaceuticals based on alternative scaffold proteins [99mTc]Tc-ADAPT6 and [99mTc]Tc-(HE.3-G3 in patients with HER2-positive breast cancer / O. D. Bragina, S. M. Deev, E. Yu. Garbukov [et al.] // Bulletin of Siberian Medicine. - 2023. - Vol. 22, No. 3. - Pp. 6-13.
8. Lemeshko B. Yu. Criteria for testing the deviation of distribution from the normal law. Manual for use / B. Yu. Lemeshko. - Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2014. - 192 p.
9. Gubler E.V., Genkin A.A. Application of nonparametric statistical tests in biomedical research. M., 1973.
10. Hollender M., Wolfe D. Nonparametric Methods of Statistics. - M.: Finance and Statistics, 1983. - 518 p.

Selikhov Aleksey Vladimirovich

«Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel
Candidate of technical sciences, assistant professor of
department of instrumentation, metrology, and
certification
302026, Orel, Komsomolskaya Street, 95
+79004841497
Selihov.ostu@yandex.ru

Revyakina Maria Olegovna

«Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel
Candidate of Sciences (Medical), Leading Researcher of
the Laboratory of Molecular, Translational and Digital
Cardioimmunology
302026, Orel, Komsomolskaya Street, 95
+79200896990
e-mail: mplotnikova@mail.ru

Chapcha Vyacheslav Andreevich

«Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel
Student of the Department of Electronics, Radio
Engineering, and Communication Systems
302026, Orel, Komsomolskaya Street, 95
+79536277424
eriss603@yandex.ru

Merkulov Kirill Alekseevich

«Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel
Student of the Department of Electronics, Radio
Engineering, and Communication Systems
302026, Orel, Komsomolskaya Street, 95
+79534776560
eriss603@yandex.ru

© Селихов А.В., Ревякина М.О., Чапча В.А., Меркулов К.А., 2025

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 681-518-3, 621-793

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-374-6-159-165

ЗИНЧЕНКО Т.О.

ПРОТОТИП ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА СПРЕЙ-ПИРОЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЁНОК $SnO_2:Sb$

Аннотация. Представлен прототип информационно-измерительной системы для контроля процесса спрей-пиролиза и прогнозирования параметров тонких плёнок $SnO_2:Sb$. Система интегрирует различные датчики для мониторинга технологических параметров и использует эмпирическую модель для прогнозирования толщины и проводимости плёнок. Разработан алгоритм прогнозирования на основе экспериментальных данных, позволяющий оптимизировать технологические режимы получения прозрачных проводящих оксидов.

Ключевые слова: спрей-пиролиз, $SnO_2:Sb$, информационно-измерительная система, тонкие плёнки, прогнозирование параметров, прозрачные проводящие оксиды.

Введение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) представляют собой важный класс функциональных материалов, находящих широкое применение в оптоэлектронных устройствах, солнечных элементах, жидкокристаллических дисплеях и сенсорных технологиях [1, 2]. Среди различных методов получения тонких плёнок ППО спрей-пиролиз является одним из наиболее перспективных благодаря своей простоте, экономичности и возможности масштабирования [3].

Оксид олова, легированный сурьмой ($SnO_2:Sb$), является одним из наиболее изученных ППО, обладающих оптимальным сочетанием прозрачности в видимом диапазоне спектра и высокой электропроводности [4, 5]. Однако процесс спрей-пиролиза характеризуется множеством взаимосвязанных параметров, что затрудняет получение воспроизводимых результатов и оптимизацию свойств плёнок.

Современные требования к качеству тонких плёнок и эффективности технологических процессов диктуют необходимость создания интегрированных информационно-измерительных систем, способных осуществлять непрерывный мониторинг технологических параметров и прогнозировать свойства получаемых плёнок [6, 7]. Такие системы позволяют не только контролировать процесс в реальном времени, но и оптимизировать технологические режимы на основе математических моделей [8].

Целью данной работы является разработка прототипа информационно-измерительной системы для контроля процесса спрей-пиролиза и прогнозирования толщины тонких плёнок $SnO_2:Sb$, включающей комплекс датчиков для мониторинга технологических параметров и алгоритм прогнозирования свойств плёнок на основе эмпирической модели.

Основная часть

Спрей-пиролиз представляет собой метод получения тонких плёнок путём термического разложения аэрозоля, содержащего прекурсоры металлов, на нагретую подложку. Этот метод относится к химическим методам осаждения из газовой фазы (CVD) [9] и характеризуется простотой реализации, экономичностью и возможностью получения плёнок на подложках большого размера. На рисунке 1 представлена общая схема процесса нанесения покрытий методом спрей-пиролиза.

В ходе работы получение базы образцов $SnO_2:Sb$ включало следующие стадии:

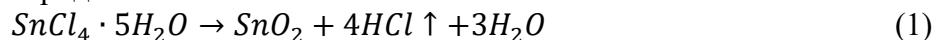
1. Формирование аэрозоля из раствора прекурсоров. Раствора прекурсоров на основе тетрахлорида пентагидрата олова и трихлорида сурьмы подаётся в распылитель. Под действием сжатого воздуха формируется мелкодисперсный аэрозоль. Размер капель аэрозоля

составляет 1...10 мкм, что обеспечивает равномерное распределение по поверхности подложки.

2. Перенос капель к подложке. Капли аэрозоля переносятся потоком газа к нагретой подложке. Скорость переноса зависит от давления в распылителе и расстояния до подложки. Также важно отметить, что частичное испарение растворителя происходит во время переноса капель к нагретой подложке.

3. Испарение растворителя. При контакте с горячей подложкой происходит быстрое испарение растворителя. На поверхности подложки остаются твёрдые частицы прекурсоров, которые в дальнейшем формируют покрытие. Скорость испарения зависит от температуры подложки и летучести растворителя.

4. Термическое разложение прекурсоров. При температурах 400...500°C происходит термическое разложение хлоридов:



Трихлорид сурьмы при температуре 400...500 °C также гидролизуется в присутствии влаги с образованием оксида сурьмы (III), который при окислении на воздухе переходит в оксид сурьмы (V) или включается в решётку SnO₂ как донорная примесь.



5. Кристаллизация оксида. Формируется, как правило, поликристаллическая структура рутила (тетрагональная сингония). Размер кристаллитов составляет 10...50 нм. Ориентация кристаллитов зависит от температуры подложки.

Скорость осаждения плёнки описывается уравнением:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = k \cdot C \cdot V \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (4)$$

где $\frac{\partial M}{\partial t}$ – скорость осаждения массы;

к – константа скорости;

Е_а – энергия активации процесса;

Т – температура подложки;

Р – газовая постоянная.

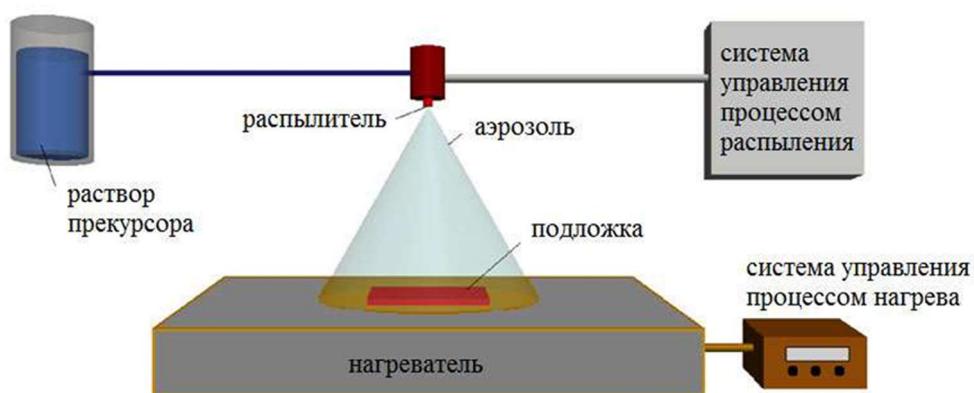


Рисунок 1 – Общая схема процесса нанесения покрытий методом спрей-пиролиза

Ключевыми технологическими параметрами, влияющими на свойства получаемых плёнок, являются основные технологические режимы метода [4], а также pH раствора и влажность атмосферы.

Температура подложки является критическим параметром, определяющим кинетику разложения прекурсоров и кристаллизацию оксида [10, 11]. При температурах ниже 350°C преобладает аморфная фаза, при 400...500 °C формируется поликристаллическая структура с оптимальными электрофизическими свойствами. Зависимость толщины пленки от температуры подложки показана на рисунке 2.

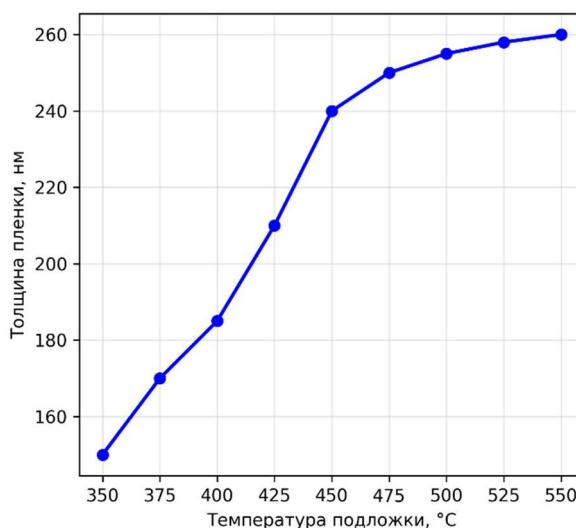


Рисунок 2 – Зависимость толщины пленки от температуры подложки

Анализ результатов показывает, что с увеличением температуры от 350 до 450°C толщина пленки возрастает линейно от 150 до 240 нм, что связано с повышением скорости химических реакций. При дальнейшем увеличении температуры до 550°C рост толщины замедляется вследствие усиления процессов испарения.

Концентрация сурьмы в растворе влияет на концентрацию носителей заряда в пленке. Оптимальная концентрация Sb составляет 3...5 ат.%, что обеспечивает максимальную проводимость при сохранении высокой прозрачности.

pH раствора влияет на стабильность прекурсоров и морфологию пленок [12]. Оптимальные значения pH находятся в диапазоне 2...4.

Для получения пленок SnO₂:Sb использовали следующие технологические режимы нанесения:

1. Температура подложки: 400...500°C;
2. Давление в распылителе: 0.5...2 атм;
3. Скорость подачи раствора: 2...10 мл/мин;
4. Время осаждения: 1...60 мин;
5. pH раствора: 2...4;
6. Концентрация Sb: 3...5 ат.%.

В качестве подложек выбрано натрий-кальций-силикатное стекло, предварительно очищенные ультразвуком в ацетоне и дейонизированной воде.

Разработанная информационно-измерительная система [13], схема которой представлена на рисунке 3, включает следующие датчики:

1. Термопара типа K для измерения температуры подложки.
2. Манометр для контроля давления в распылителе.
3. Датчик влажности для контроля атмосферы.
4. Расходомер для контроля скорости подачи раствора.
5. pH-метр для контроля кислотности раствора.
6. Оптический датчик толщины в реальном времени.

Измерение и контроль проводимости осуществляется после получения покрытия и отжига методом Ван дер Пау на измерительной системе Ecopia HMS3000. Толщина пленок измерялась профилометром Dektak 150. Основная информация о датчиках представлена в таблице 1.

Система сбора и обработки данных включает в себя многоканальный аналого-цифровой преобразователь (24 бит, частота дискретизации 1 кГц), микроконтроллер для обработки данных, программное обеспечение для визуализации и анализа.

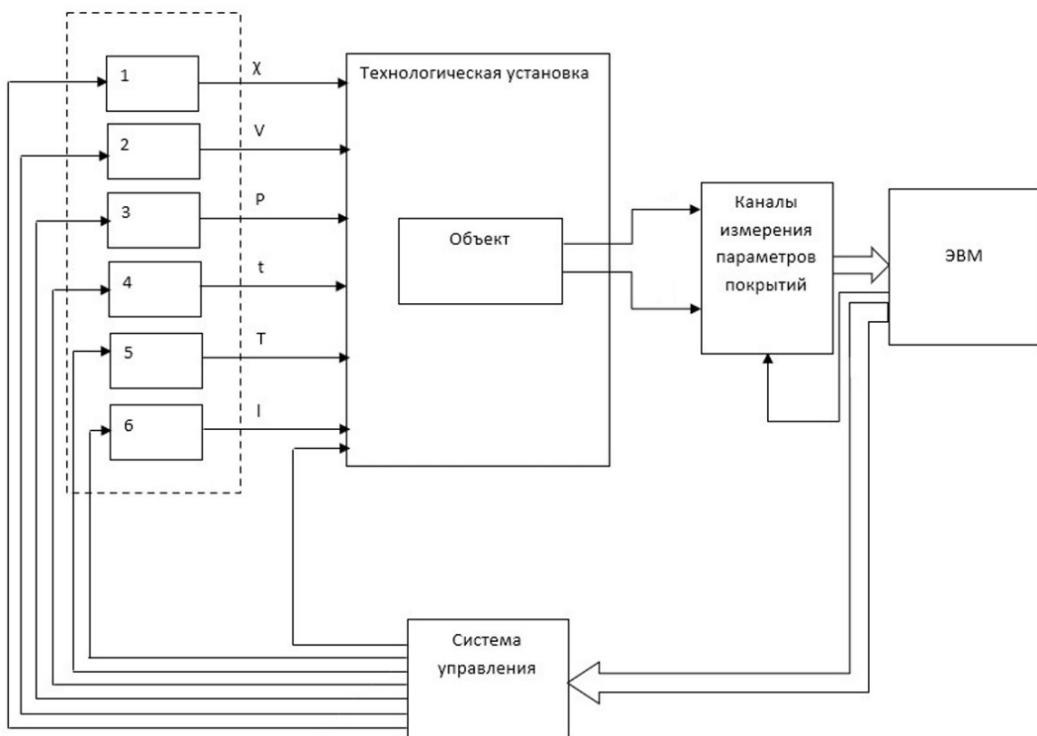


Рисунок 3 – Функциональная схема информационно-измерительной системы:

1, 2 – блоки подачи раствора, 3 – компрессор, 4 – секундомер в программном обеспечении, 5 – блок нагрева подложки, 6 – блок линейного перемещения распылителя

Таблица 1 – Характеристики датчиков информационно-измерительной системы

Датчик	Модель	Диапазон проводимых измерений	Точность	Время отклика
Термопара К	TXA-K-0,5-600	0...500 °C	±1,5 °C	<1 с
Манометр	МП-ЗУ	0...2 атм	±0.05 атм	<0.1 с
Датчик влажности	ИВТМ-7	0...100%	±2%	<5 с
Расходомер	РСЛ-0,1	0...10 мл/мин	±0.1 мл/мин	<1 с
pH-метр	pH-150	0...6	±0.1	<7 с
Оптический датчик толщины	ИТП-1	300...1000 нм	±5 нм	<0.1 с

Экспериментальные данные показали, что толщина плёнок SnO₂:Sb зависит от всех исследуемых технологических параметров. На основе анализа полученных данных разработана эмпирическая модель:

$$d = k_1 \cdot T^\alpha \cdot P^\beta \cdot V^\gamma \cdot t^\delta \cdot C^\varepsilon \cdot pH^\theta \quad (5)$$

где d – толщина плёнки (нм);

k_1 – константа;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$ – эмпирические коэффициенты.

Результаты регрессионного анализа показали следующие значения коэффициентов:

$$\alpha = 0.15 \pm 0.02, \beta = 0.25 \pm 0.03, \gamma = 0.45 \pm 0.05, \delta = 0.85 \pm 0.08, \varepsilon = 0.35 \pm 0.04, \theta = -0.12 \pm 0.02.$$

В таблице 2 представлены смоделированные и реальные значения толщины полученных прозрачных проводящих оксидов на основе диоксида олова, легированного сурьмой методом спрей-пиролиза. В таблице 2 обозначения представляют следующее: $d_{\text{эксп}}$ – измеренный на профилометре показатель толщины, $d_{\text{мод}}$ – смоделированный показатель

толщины и Δd – абсолютная погрешность, где истинным принято измеренное значение толщины.

Таблица 2 – Сравнение экспериментальных и смоделированных значений толщины полученных покрытий

№ образца	T, °C	P, атм	V, мл	t, мин	C, ат.%	pH	d _{эксп} , нм	d _{мод} , нм	Δd, нм
1	400	0.5	5	15	0.15	2.0	185	202	-17
2	400	1.0	7	30	0.20	2.5	423	458	-35
3	425	0.8	6	25	0.18	2.8	325	350	-25
4	425	1.5	9	45	0.25	3.2	781	852	-71
5	450	0.6	5	20	0.16	2.3	225	245	-20
6	450	1.2	8	40	0.22	3.0	580	632	-52
7	475	0.9	6	35	0.19	2.7	380	415	-35
8	475	1.8	10	55	0.28	3.5	978	1073	-95
9	500	0.7	5	25	0.17	2.4	283	310	-27
10	500	2.0	9	60	0.30	4.0	1056	1310	-254

Разработанная модель показывает достаточно высокую точность для направления моделирования технологического процесса, но для тонких плёнок. С ростом толщины погрешность смоделированной толщины в сравнении с измеренной также растёт. Это связано с подбором эмпирических параметров, которые были выбраны, исходя из толщины покрытий до 1 мкм.

На основе разработанных эмпирических моделей создан алгоритм прогнозирования, включающий следующие этапы:

1. Ввод технологических параметров;
2. Проверка корректности входных данных;
3. Расчёт толщины плёнки по модели 5;
4. Оценка неопределённости прогноза;
5. Вывод результатов с доверительными интервалами.

Для проверки адекватности разработанных моделей проведена серия валидационных экспериментов с параметрами, не использованными при построении моделей (таблица 3). Результаты показали, что средняя относительная ошибка прогнозирования толщины составляет 8.5%, что является приемлемым для практического применения.

Таблица 3 – Результаты валидации моделей прогнозирования

№ Образца	Экспериментальное значение	Прогнозируемое значение	Относительная погрешность (%)
1	380 нм	412 нм	8.4
2	520 нм	485 нм	6.7
3	290 нм	315 нм	8.6

Заключение

Разработан прототип информационно-измерительной системы для контроля процесса спрей-пиролиза и прогнозирования толщины тонких плёнок SnO₂:Sb. Система включает комплекс датчиков для мониторинга технологических параметров и алгоритм прогнозирования на основе эмпирической модели.

Основные результаты работы:

1. Создана эмпирическая модель для прогнозирования толщины плёнок SnO₂:Sb с коэффициентом корреляции $R^2 = 0.92$.
2. Реализован алгоритм прогнозирования, интегрированный в информационно-измерительную систему.

3. Проведена валидация моделей, показавшая приемлемую точность прогнозирования (относительная ошибка 8.5% для толщины и 12.3% для проводимости).

Разработанная система может быть использована для оптимизации технологических режимов получения прозрачных проводящих оксидов и повышения воспроизводимости результатов спрей-пиролиза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heera, S. Recent advances in transparent oxide materials and devices / Heera S, Arya Mohan, P Meenu, V.J. Anjana Nair, K G Deepa // Electric and Electronic Applications of Metal Oxides. – 2025. – P. 385–405.
2. Averi, G. Transparent Conducting Oxide Nanocrystals: Synthesis, Challenges, and Future Prospects for Optoelectronic Devices / Averi Guha, Tapas K. Paira, Sanjit Sarkar // Physica Status Solidi. – 2023. – № 220. – P. 385–405.
3. Andualem Belachew, W. An comprehensive review on the spray pyrolysis technique: Historical context, operational factors, classifications, and product applications / Andualem Belachew Workie, Henni Setia Ningsih, Shao-Ju Shih // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2023. – T. 170. – P. 105915.
4. Zinchenko, T. The properties study of transparent conductive oxides (TCO) of tin dioxide (ATO) doped by antimony obtained by spray pyrolysis / T. Zinchenko, E. Pecherskaya, D. Artamonov // AIMS Materials Science. – 2019. – T. 6, № 2. – P. 276–287.
5. Hamdadou, N.-E. H. Morphological Characterization of Sb-Doped SnO₂ Thin Films Developed by Spray Pyrolysis. /Hamdadou, N.-E. H.// Physics of Semiconductor Devices & Renewable Energies Journal. – 2024. – Vol. 1. – P. 4–8.
6. Boivin, D. Phase formation prediction in magnetron sputtered Cu(Ti)Zn thin films: Numerical vs experimental approaches / D. Boivin, A. Jagodar, P. Brault, T. Vaubois, E. Menou, B. Aspe, A. Caillard, M. Cavarroc-Weimer, A. Thomann// Journal of Applied Physics. – 2025. – Vol. 137, № 14. – P. 145301.
7. Shin, D. Y. Autonomous Thin-Film Profile Predictions for Inkjet-Printed OLEDs from Aerial Microscopic Images using Deep Learning / D. Y. Shin, Y. Noh, K. H. Cho, B. Ju, K. Kang // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2025. – Vol. 12. – P. 1037–1047.
8. Markov, A. V. Selection of optimal parameters of technological modes for the synthesis of polymer composite materials based on verified mathematical models / A. V. Markov, O. A. Oreshina// Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1889. – P. 022010.
9. Ma, T. A novel and potentially scalable CVD-based route towards SnO₂:Mo thin films as transparent conducting oxides /T. Ma, M. Nikiel, A. Thomas, M. Missous, D. Lewis // Journal of Materials Science. – 2021. – Vol. 56. – P. 15921–15936.
10. Verma, A. Study of structural/microstructural and optical characteristics of tin oxide (SnO₂) thin film grown at different substrate temperatures of 325 °C, 375 °C, 425 °C by spray pyrolysis method / A. Verma, K. Shriram, B. Das // Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials. – 2025. – Vol. 17. – P. 141–149.
11. Mohmad, A. Effect of substrate temperature on the structural and optical properties of CdO thin films prepared using spray pyrolysis /A. Mohmad, A. Aldabagh, T. Zaker, M. Uonis, T. Polus// Journal of Optics. – 2025.
12. Doubi, Y. Effect of experimental conditions on the fabrication of SnO₂ thin films via spray pyrolysis technique / Y. Doubi, B. Hartiti, H. Labrim, M. Tahri, P. Thevenin // MRS Advances. – 2024.
13. Зинченко, Т. О. Структура информационно-измерительной и управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов / Т. О. Зинченко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2023. – № 2. – С. 22–27.

Зинченко Тимур Олегович

ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Пенза

Ст. преподаватель кафедры информационно-измерительной техники и метрологии

440026, г. Пенза, ул. Красная, 40

E-mail: scar0243@gmail.com

ZINCHENKO T.O.

PROTOTYPE OF AN INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEM FOR SPRAY PYROLYSIS PROCESS MONITORING AND SnO₂:Sb THIN FILM THICKNESS PREDICTION

Abstract. This paper presents a prototype information-measurement system designed for spray pyrolysis process monitoring and SnO₂:Sb thin film parameter prediction. The system integrates multiple sensors for real-time process

parameter tracking and employs an empirical model to forecast film thickness and conductivity. A predictive algorithm was developed based on experimental data, enabling optimization of deposition parameters for transparent conductive oxide fabrication.

Keywords: spray pyrolysis, $SnO_2:Sb$, information-measurement system, thin films, parameter prediction, transparent conductive oxides.

BIBLIOGRAPHY

1. Heera, S. Recent advances in transparent oxide materials and devices / Heera S, Arya Mohan, P Meenu, V.J. Anjana Nair, K G Deepa // Electric and Electronic Applications of Metal Oxides. – 2025. – P. 385–405.
2. Averi, G. Transparent Conducting Oxide Nanocrystals: Synthesis, Challenges, and Future Prospects for Optoelectronic Devices / Averi Guha, Tapas K. Paira, Sanjit Sarkar // Physica Status Solidi. – 2023. – № 220. – P. 385–405.
3. Andualem Belachew, W. An comprehensive review on the spray pyrolysis technique: Historical context, operational factors, classifications, and product applications / Andualem Belachew Workie, Henni Setia Ningsih, Shao-Ju Shih // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2023. – T. 170. – P. 105915.
4. Zinchenko, T. The properties study of transparent conductive oxides (TCO) of tin dioxide (ATO) doped by antimony obtained by spray pyrolysis / T. Zinchenko, E. Pecherskaya, D. Artamonov // AIMS Materials Science. – 2019. – T. 6, № 2. – P. 276–287.
5. Hamdadou, N.-E. H. Morphological Characterization of Sb-Doped SnO_2 Thin Films Developed by Spray Pyrolysis. /Hamdadou, N.-E. H.// Physics of Semiconductor Devices & Renewable Energies Journal. – 2024. – Vol. 1. – P. 4–8.
6. Boivin, D. Phase formation prediction in magnetron sputtered $Cu(Ti)Zn$ thin films: Numerical vs experimental approaches / D. Boivin, A. Jagodar, P. Brault, T. Vaubois, E. Menou, B. Aspe, A. Caillard, M. Cavarroc-Weimer, A. Thomann// Journal of Applied Physics. – 2025. – Vol. 137, № 14. – P. 145301.
7. Shin, D. Y. Autonomous Thin-Film Profile Predictions for Inkjet-Printed OLEDs from Aerial Microscopic Images using Deep Learning / D. Y. Shin, Y. Noh, K. H. Cho, B. Ju, K. Kang // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2025. – Vol. 12. – P. 1037–1047.
8. Markov, A. V. Selection of optimal parameters of technological modes for the synthesis of polymer composite materials based on verified mathematical models / A. V. Markov, O. A. Oreshina// Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1889. – P. 022010.
9. Ma, T. A novel and potentially scalable CVD-based route towards $SnO_2:Mo$ thin films as transparent conducting oxides /T. Ma, M. Nikiel, A. Thomas, M. Missous, D. Lewis // Journal of Materials Science. – 2021. – Vol. 56. – P. 15921–15936.
10. Verma, A. Study of structural/microstructural and optical characteristics of tin oxide (SnO_2) thin film grown at different substrate temperatures of 325 °C, 375 °C, 425 °C by spray pyrolysis method / A. Verma, K. Shriram, B. Das // Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials. – 2025. – Vol. 17. – P. 141–149.
11. Mohmad, A. Effect of substrate temperature on the structural and optical properties of CdO thin films prepared using spray pyrolysis /A. Mohmad, A. Aldabagh, T. Zaker, M. Uonis, T. Polus// Journal of Optics. – 2025.
12. Doubi, Y. Effect of experimental conditions on the fabrication of SnO_2 thin films via spray pyrolysis technique / Y. Doubi, B. Hartiti, H. Labrim, M. Tahri, P. Thevenin // MRS Advances. – 2024.
13. Zinchenko, T. O. Structure of the information-measuring and control system for synthesis of transparent conductive oxides / T. O. Zinchenko // Measurement. Monitoring. Management. Control. – 2023. – № 2. – P. 22–27.

Zinchenko Timur Olegovich

Penza State University, Penza

Senior Lecturer,

Department of Information-Measurement Technology
and Metrology

40 Krasnaya Street, Penza, 440026, Russia

E-mail: scar0243@gmail.com

© Зинченко Т.О., 2025

ВОРОНИНА О.А., ТУГАРЕВ А.С., ДОНЦОВ В.М., МИШИН В.В., ПЛАЩЕНКОВ Д.А.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ В КОРПУС

Аннотация. Статья посвящена анализу методов контроля монтажа кристаллов в корпус как части технологического процесса сборки микросхем. Рассмотрены базовые методы разрушающего и неразрушающего контроля монтажа на основе приклеивания, выявлены доминирующие причины брака на данной операции.

Ключевые слова: монтаж кристаллов, методы контроля, визуальный контроль, инструментальный контроль, брак.

Введение

Целью данной статьи является сравнительный анализ методов контроля качества монтажа кристаллов в корпус и выявление причин возникновения брака на данной технологической операции.

Основная часть

В технологическом процессе сборки микросхем [1] одной из базовых технологических операций является монтаж кристаллов в корпус – металлокерамический или пластиковый с открытой полостью (air cavity или open cavity). Обычно применяется метод прямого контакта, когда монтаж кристалла производится нижней (нерабочей) стороной к основанию корпуса (рисунок 1), а электрическое соединение контактных площадок кристалла с контактными площадками корпуса осуществляется специально выбранной по совокупности параметров проволокой [2].

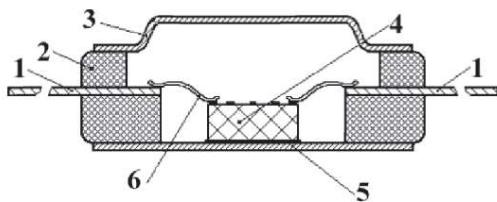


Рисунок 1 – Метод прямого контакта при монтаже кристалла в корпус [2]:

1 – внешние выводы, 2 – корпус, 3 – крышка корпуса, 4 – кристалл,
5 – основание корпуса, 6 – проволока.

Для монтажа могут быть использованы такие способы получения соединений как пайка или склеивание. В процессе корпусирования микросхем для монтажа в большинстве случаев применяется посадка на клей, технологически более простая, чем, например, посадка на эвтектику. Как правило, кристалл должен иметь электрический контакт с металлизированной монтажной площадкой корпуса, следовательно, монтаж кристалла необходимо производить на токопроводящий материал. Оптимальным вариантом монтажа является метод наклейки кристалла на токопроводящий клей (ТОК-2, ЕРО-ТЕК Н20S и др.) [3].

Качество монтажа кристалла в корпус Y можно представить как функцию от следующих действующих факторов:

$$Y = f(A, B, C), \quad (1)$$

где A – режим при монтаже методом наклейки;

B – инструмент;

C – материалы и комплектующие.

Качество монтажа кристалла должно соответствовать типовым требованиям [4, 5]. Не допускаются следующие дефекты:

1) затекание клея на траверсы корпусов, ободок корпуса, на контактные площадки и поверхность кристалла;

- 2) замыкание траверс между собой и монтажной площадки корпуса с траверсой токопроводящим kleem;
 3) отслоение кристалла.

Точность монтажа кристалла и ориентация кристалла относительно корпуса должна соответствовать требованиям конструкторской документации на микросхему.

В таблице 1 представлены дефекты монтажа и их относительная частота – статистика собрана при автоматическом монтаже кристаллов в металлокерамические корпуса на установке Minder Hightech MDAX64DI для 100 партий (около 125 тыс. кристаллов, до 6 тыс. кристаллов в смену) – всего 4125 дефектов (3,3% от всех изделий).

Таблица 1 – Виды дефектов и их относительная частота

Номер	Вид дефекта	Частота, %
1	наличие kleя на кристалле (рисунок 2 а)	21,70
2	наличие kleя на траверсах (контактных площадках корпуса и между ними) (рисунок 2 б)	25,84
3	недостаточное (рисунок 2 в) или избыточное количество kleя под кристаллом	8,48
4	отклеивание кристалла от основания корпуса	0,08
5	смещение кристалла (рисунок 2 г)	0,36
6	неверная ориентация кристалла	0
7	трещины на кристалле	0
8	скол кристалла (рисунок 2 д)	7,59
9	царапины, риски на кристалле (рисунок 2е)	6,55
10	загрязнение поверхности кристалла	2,90
11	брак корпусов (нарушение металлизации контактных площадок и др.)	26,50

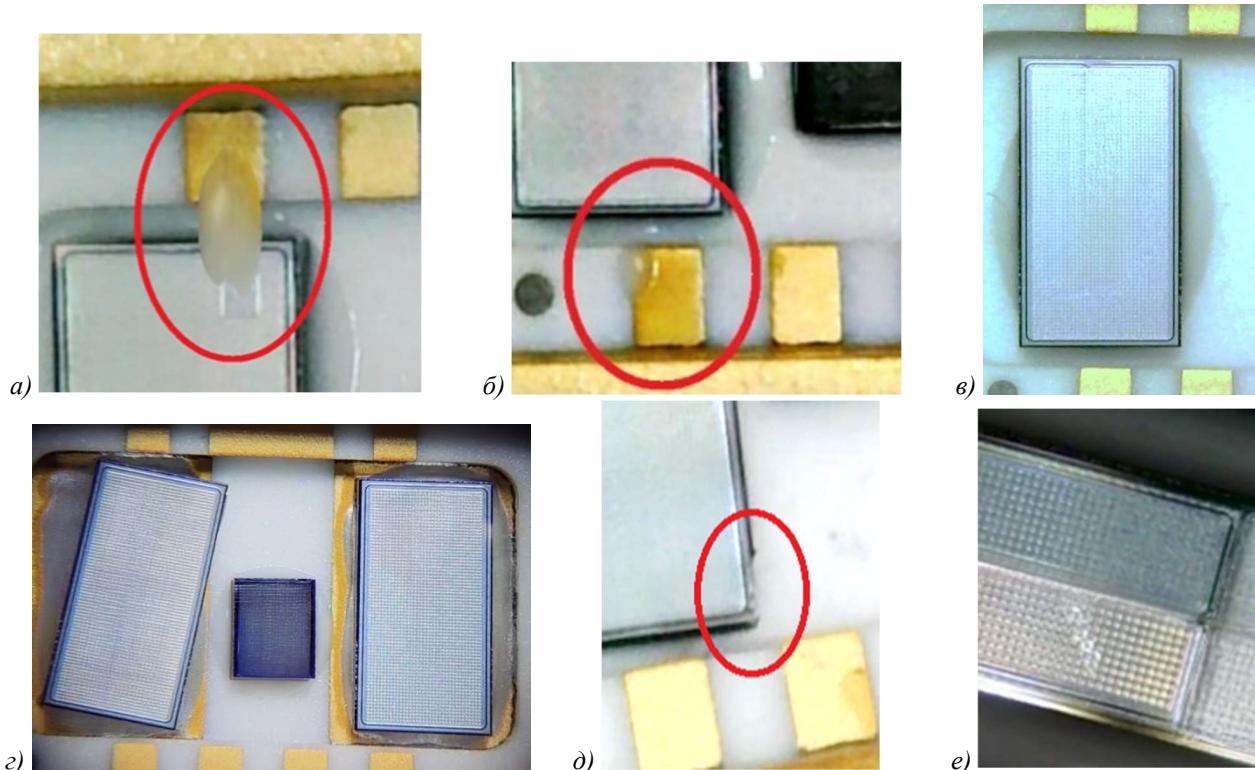


Рисунок 2 – Дефекты на операции приклеивания:

- а) kleй на кристалле; б) kleй на траверсе; в) недостаток kleя по периметру кристалла;
 г) смещение кристалла; д) скол кристалла; е) царапины

Ряд дефектов (6, 7) в данном эксперименте не наблюдался, но эти дефекты могут иметь место при ручном и автоматизированном монтаже на установках монтажа кристаллов (например, УМС-100П);

- вследствие ошибки оператора при позиционировании кристалла (6);
- при излишнем усилии прижатия вакуумной присоски с кристаллом к основанию корпуса (7).

В таблице 2 представлена матрица соответствия дефектов причинам их возникновения [6] (дефект 11 не включён, так как может быть полностью устранён входным контролем):

Таблица 2 – Матрица соответствия дефектов и причин их возникновения

Причина	Дефект	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Отклонение режима при монтаже методом наклейки</i>											
Усилие прижатия кристалла меньше нормы				+	+						
Усилие прижатия кристалла больше нормы	+	+		+					+		
Температура отверждения клея меньше нормы				+	+						
Температура отверждения клея больше нормы				+							
Время отверждения клея меньше нормы				+	+						
Время отверждения клея больше нормы				+							
<i>Некачественный инструмент (штемпель или вакуумный захват кристалла)</i>											
Размеры инструмента не соответствуют размерам кристалла	+	+	+	+	+		+	+	+	+	
Загрязнение, окалина на инструменте	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
Износ рабочей части инструмента	+	+	+	+	+		+	+	+	+	
<i>Некачественные материалы и комплектующие</i>											
Загрязнённость оснований корпусов				+	+						
Внутреннее напряжение в кристалле								+			
Состав клея не соответствует ТУ					+						
Вязкость клея меньше нормы	+	+		+	+						
Вязкость клея больше нормы				+	+						
Загрязнение обратной стороны кристалла				+	+				+		
Влияние оператора	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Нарушение вакуумной гигиены					+						+
Несоответствие геометрических размеров кристаллов чертежу					+				+	+	

Методы контроля при монтаже кристалла в корпус могут быть классифицированы на группы:

- входной контроль кристаллов;
- входной контроль корпусов;
- контроль качества клея;
- контроль исправности оборудования (проверку исправного состояния штемпелей, пневматических дозаторов, вакуумных систем, органов управления, механики установок и т.п.);
- оптический контроль в ходе монтажа;
- визуальный контроль качества монтажа;
- инструментальный контроль качества монтажа.

Для работы с kleem необходимо, чтобы фактическая вязкость клея совпадала с вязкостью клея, заявленной в технических условиях. В технических условиях на клей предусмотрен контроль вязкости методом круга. Она производится с целью минимизации вероятностей дефектов 1-5. После проверки вязкости клея по методу круга, при совпадении фактической вязкости с заявленной в технических условиях – уменьшается шанс появления

дефектов при монтаже кристалла в основание корпуса. Рекомендовано проверять качество клея не реже, чем дважды в смену.

Оптический контроль в ходе монтажа реализуется оборудованием. При этом не всегда имеется возможность контроля рабочей области установки под переменными углами. В автоматизированных установках, как правило, имеется микроскоп, дающий изображение под углом 30-45°, но часто имеется и видеокамера, строго перпендикулярная к поверхности рабочего столика, выводящая изображение на дисплей. В автоматических установках часто она является единственной – микроскопа нет. При этом перпендикулярная камера обычно не позволяет увидеть царапины на кристалле (получаемые, например, за счёт проскальзывания кристалла на вакуумном прижиме). Более того, в ряде установок система технического зрения реализована только в чёрно-белом режиме, что ухудшает визуализацию мелких дефектов. Общим решением проблемы представляется внедрение дополнительных цветных видеокамер, выводящих изображение на мониторы: наличие двух или трёх камер и мониторов представляется оправданным, поскольку стоимость доработки многократно ниже стоимости установки в целом и соизмерима со стоимостью нескольких десятков металлокерамических корпусов.

Визуальный контроль качества монтажа проводится после операции приклеивания под микроскопом при увеличении не менее 16^х.

При проведении данного вида неразрушающего контроля не допускается:

- наличие клея на траверсах корпуса и поверхности кристалла;
- любые трещины, сколы на кристалле;
- царапины, риски на кристалле, не исчезающие под разным углом освещения;
- загрязнения на поверхности кристалла;
- наличие клея менее 3/4 периметра кристалла (рисунок 3);
- уровень клея выше 1/2 толщины кристалла (рисунок 4);
- отслоение кристалла от основания корпуса;
- несоответствие ориентации кристалла относительно корпуса.

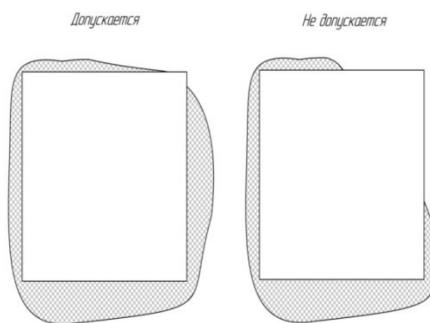


Рисунок 3 – Наличие клея по периметру кристалла

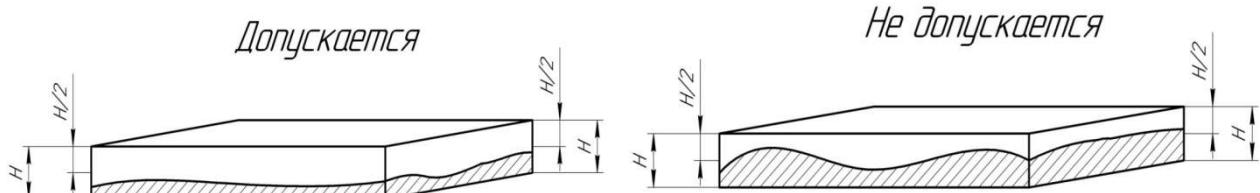


Рисунок 4 – Допустимое и недопустимое наличие клея по высоте кристалла:
 H – высота кристалла; $H/2$ – 1/2 высоты кристалла.

Для инструментального контроля прочности соединений могут применяться как профессиональные тестеры механических испытаний кристалла на сдвиг (HAWK-8200S, Dage 4000 Plus, УМС-ТМИ-02/5000 – рисунок 5 и др.), обеспечивающих неразрушающий контроль,

так и приспособления, позволяющие осуществить только разрушающий контроль (и фиксирующих только порог разрушения).

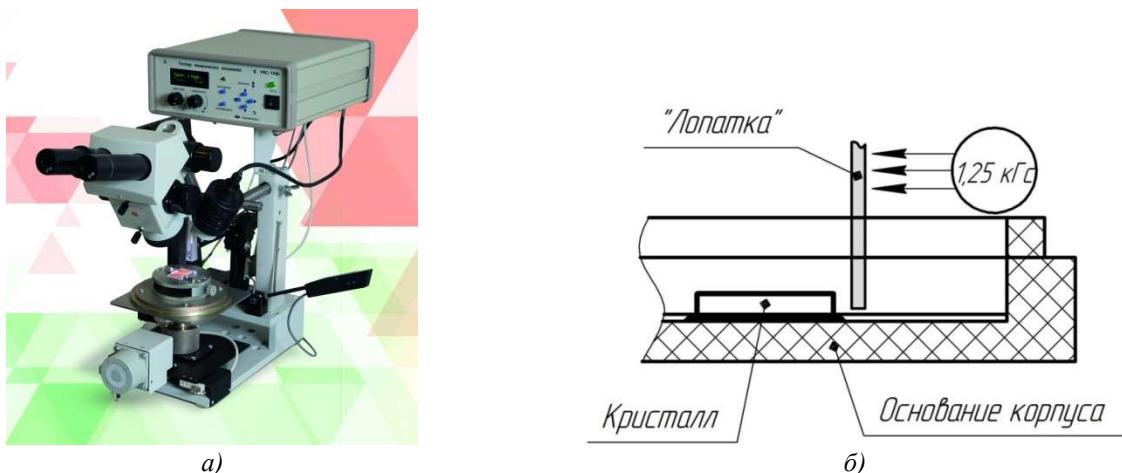


Рисунок 5 – Тестер механических испытаний УМС-ТМИ-02/5000:
а – общий вид, б – схема контроля

При этом используется метод проверки прочности соединений путём приложения заданного усилия к полупроводниковому кристаллу (через лопаточку, подводимую к краю кристалла на уровне 0,2-0,3 мм от дна основания корпуса). Слишком низкое позиционирование лопаточки может привести к касанию основания корпуса, а слишком высокое – к сколу кристалла. Рекомендуется предварительная настройка высоты лопаточки для каждой пары «кристалл – основание корпуса» с использованием штангенциркуля или микрометра. Показателем качества клеевого соединения является предел прочности при сдвиге [3, 8]:

$$\tau = P/F, \quad (2)$$

где P – разрушающая сила;
 F – площадь склеивания.

Слишком быстрое движение лопаточки также может привести к раскалыванию кристалла ранее достижения предела прочности при сдвиге.

Как правило, контроль прочности клеевого соединения проводится в начале каждой партии и в начале каждой смены.

При монтаже методом штемпелевания установлено, что наиболее вероятной причиной дефекта 3 (рисунок 3) является недостаточное дозирование клея при монтаже. Предотвратить дефект можно увеличив высоту клеевого валика в растирочной чаше установки. Причиной дефекта на рисунке 4 (почти не наблюдаемого в условиях отлаженного производства) является избыточное дозирование клея при монтаже; предотвратить дефект можно, уменьшив высоту клеевого валика в растирочной чаше установки [8].

При монтаже методом дозирования клея желательно контролировать объём капли, но непосредственно это трудноосуществимо. Можно реализовать расчёт зависимости объёма капли от давления в пневмосистеме и уровня клея в дозаторе – и при уменьшении уровня постепенно понижать давление.

Заключение

В исследовании проведён анализ методов монтажа кристаллов в корпус, возникающих видов дефектов и вызывающих их причин. Предложено:

- использовать дополнительные (и желательно цветные) оптические системы, позволяющие наблюдать рабочее поле установщика кристаллов под различными углами, и фиксировать дефекты в процессе их появления;
- проверять качество клея не реже, чем дважды в смену.
- точно позиционировать высоту лопаточки при контроле на сдвиг;

- при посадке на клей методом штемпелевания – регулярно контролировать высоту kleевого валика в растирочной чаше установки;
- при посадке на клей методом дозирования – понижать давление по мере расхода клея.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Анализ методов контроля микропроволочных соединений / О.А. Воронина, В.В. Мишин, А.С. Тугарев, К.С. Харланова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2023. - № 6 (362). - С.153-159.
2. Смирнов, В. И. Технология интегральных микросхем : учебное пособие / В. И. Смирнов. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. - 244 с.
3. К выбору kleевых композиций для монтажа кристаллов / О.А. Воронина, В.В. Мишин, К.Н. Рубцов, А.С. Тугарев // Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием "Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития", Тамбов, 10.05.2023. - Тамбов: ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", 2023. - С.123-125.
4. ОСТ 11 073.013 Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Методы визуального контроля. Часть 4.
- 5 Зенин, В.В. Монтаж кристаллов и внутренних выводов в производстве полупроводниковых изделий: монография / В.В. Зенин – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013 - 236 с.
6. РД 11 0274-90 Микросхемы интегральные. Технические требования к техническому процессу сборки. ОКП
- 7 Тестер механических испытаний УМС-ТМИ-02/5000 // «Эко-Тех Микроэлектроника» – URL: <https://micro-bond.com/ums-tmi-02/>.
- 8 Контроль и испытания при корпусировании микросхем / О.А. Воронина, В.М. Донцов, А.С. Тугарев // X Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы физико-математических наук», Орёл, 29.11.2024 - 30.11.2024. - Орёл: ОГУ имени И. С. Тургенева, 2024. - С.331-337.

Воронина Оксана Александровна

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Доцент кафедры электроники, радиотехники и
систем связи
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail:Voronina_o_a@mail.ru

Тугарев Алексей Святославович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Доцент кафедры электроники, радиотехники и
систем связи
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: tugarev@yandex.ru

Донцов Венедикт Михайлович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Доцент кафедры электроники, радиотехники и
систем связи
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: dwm257@yandex.ru

Мишин Владислав Владимирович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Заведующий кафедрой электроники,
радиотехники и систем связи
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: zam_fdo@mail.ru

Плащенков Дмитрий Алексеевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Старший преподаватель кафедры электроники,
радиотехники и систем связи
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: rv3eff@yandex.ru

VORONINA O.A., TUGAREV A.S., DONTSOV V.M., MISHIN V.V., PLASHCHENKOV D.A.

ANALYSIS OF CRYSTAL MOUNTING CONTROL METHODS

Abstract. The article is devoted to the analysis of methods of control of mounting of crystals in the case as part of the technological process of assembly of microchips. The basic methods of destructive and non-destructive control of mounting based on gluing are considered, the dominant reasons of marriage at this operation are revealed.

Keywords: crystal mounting, control methods, visual control, instrumental control, and defects.

BIBLIOGRAPHY

- 1 Analysis of Methods for Monitoring Microwire Connections / O.A. Voronina, V.V. Mishin, A.S. Tugarev, and K.S. Kharlanova // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. - 2023. - No. 6 (362). - Pp. 153-159.
2. Smirnov, V. I. Technology of Integrated Circuits: Textbook / V. I. Smirnov. - Moscow ; Vologda : Infra-Engineering, 2023. - 244 p.
3. To the choice of adhesive compositions for mounting crystals / O.A. Voronina, V.V. Mishin, K.N. Rubtsov, A.S. Tugarev // The Eighth All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation "Radio-Electronics. Problems and Prospects of Development", Tambov, 10.05.2023. - Tambov: Tambov State Technical University, 2023. - P.123-125.
4. OST 11 073.013 Integrated circuits. Test methods. Visual inspection methods. Part 4.
- 5 Zenin, V.V. Mounting of crystals and internal leads in the production of semiconductor products: monograph / V.V. Zenin – Voronezh: Voronezh State Technical University, 2013 - 236 p.
6. RD 11 0274-90 Integrated circuits. Technical requirements for the assembly process. OKP.
- 7 Mechanical testing tester UMS-TMI-02/5000 // Eco-Tech Microelectronics – URL: <https://micro-bond.com/ums-tmi-02/>.
- 8 Control and testing during chip packaging / O.A. Voronina, V.M. Dontsov, and A.S. Tugarev // X All-Russian Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Physical and Mathematical Sciences", Oryol, 29.11.2024 - 30.11.2024. - Oryol: OSU named after I. S. Turgenev, 2024. - Pp. 331-337.

Voronina Oksana Aleksandrovna

Orel State University

Associate Professor of the Department of Electronics,
Radio Engineering and Communication Systems
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: Voronina_o_a@mail.ru

Tugarev Aleksej Svyatoslavovich

Orel State University

Associate Professor of the Department of Electronics,
Radio Engineering and Communication Systems
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: tugarev@yandex.ru

Dontsov Venedikt Mikhailovich

Orel State University

Associate Professor of the Department of Electronics,
Radio Engineering and Communication Systems
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: dwm257@yandex.ru

Mishin Vladislav Vladimirovich

Orel State University

Head of the Department of Electronics, Radio
Engineering and Communication Systems
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: zam_fdo@mail.ru

Plashchenkov Dmitry Alekseevich

Orel State University

Senior Lecturer of the Department of Electronics,
Radio Engineering and Communication Systems
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: rv3eff@yandex.ru

© Воронина О.А., Тугарев А.С., Донцов В.М., Мишин В.В., Плащенков Д.А., 2025

МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ДИНАМИКА, НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ
МЕХАНИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

УДК 550.384.31

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-374-6-173-178

ПЕРЕПАДЯ К.В., ЛЕКАРЕВ Г.В., БАЛАШОВ М.Г., ЛЕВЧУК Н.А.

**МЕТОДИКА РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА
СУДОВОГО РУЛЕВОГО УСТРОЙСТВА**

Аннотация. Обеспечение заданной точности изготовления механизмов и конструкций, относящихся к машиностроительной отрасли, имеет безусловно важное значение, для повышения эффективности и экономичности их эксплуатации.

Ключевые слова: размерная цепь, перо руля, рулевое устройство, звенья.

Введение

Для решения задач по точности изготовления деталей, сборки и монтажа судовых конструкций и механизмов применяется размерный анализ, состоящий в решении размерных цепей – совокупности последовательно расположенных звеньев, образующих замкнутый контур и непосредственно влияющих на исходное (замыкающее) звено, причем, каждое следующее звено должно начинаться из конца предыдущего [1, 2, 3].

Цель работы показать решение задачи обеспечения точности сборки судового рулевого устройства.

В данной работе рассматривается задача, когда известны размер, допуск и предельные отклонения исходного (замыкающего) звена, определяемые служебным назначением механизма, а допуски на $(m-1)$ составляющее звено необходимо определить такими, чтобы после их изготовления и сборки допуск исходного звена был безусловно обеспечен.

Для расчета размерных цепей существует 5 методов: метод полной взаимозаменяемости, вероятностный метод, метод групповой взаимозаменяемости, метод пригонки, метод регулировки.

1 Метод полной взаимозаменяемости. Суть метода состоит в том, что точность замыкающего звена обеспечивается всякий раз при включении в цепь новых или замене составляющих звеньев без их подбора и пригонки.

Метод характеризуется очень жесткими допусками:

$$T_{\Delta} \geq \sum T_i \quad (1)$$

2 Вероятностный метод. Суть метода состоит в том, что точность замыкающего звена обеспечивается не всякий раз, но в большинстве случаев, при включении в цепь новых или замене составляющих звеньев без их подбора и пригонки.

Оказывается, если при обработке всех деталей их размеры распределялись по закону Гаусса, т.е. при их обработке на настроенных станках действовали только случайные погрешности (отсутствовали систематические), то процент некачественной сборки не превысит 0,27 %:

$$T_{\Delta} \geq \sqrt{\sum T_i^2} \quad (2)$$

3 Метод пригонки. Если точность замыкающего звена не удается обеспечить первыми двумя методами, то допуски на составляющие звенья назначают экономически целесообразными, а точность замыкающего звена обеспечивают за счет включения в цепь специального компенсирующего звена, причем его размер изменяют путем припиливания.

4 Метод регулировки отличается от предыдущего тем, что размер компенсирующего звена изменяют путем подбора набора прокладок.

5 Метод групповой взаимозаменяемости. Точность замыкающего звена обеспечивается всякий раз при включении в цепь составляющих звеньев из одноименных групп.

Этот метод при жестком функциональном допуске позволяет значительно расширить

производственный допуск и применяется для обеспечения точности сборки прецизионных пар.

Недостаток метода – большой объем незавершенного производства (до 30 %).

Методика расчета размерных цепей

Для расчета размерных цепей, имея только одно уравнение (1) или (2), необходимо определить $(m-1)$ допуск составляющих звеньев. Задача является статически неопределенной. Для ее решения используют два принципа [4, 5, 6]:

- 1) принцип равных влияний (равных допусков) и
- 2) принцип равной точности.

По принципу равных влияний считают, что все составляющие звенья в равной степени влияют на допуск замыкающего звена, при этом определяют средний допуск. В противном случае применяют **принцип равной точности**, по которому допуски на составляющие звенья рассчитываются примерно по одному квалитету. Поскольку методики расчета методами полной взаимозаменяемости и вероятностным методом аналогичны, сведем их в таблицу 1.

После составления схемы размерной цепи, проверки выполнения ее основного уравнения и определения параметров замыкающего звена (допуска T_Δ , верхнего и нижнего отклонения ES_Δ , EI_Δ , координаты середины поля допуска DC_Δ) расчет ведут следующим образом.

Таблица 1 – Методика расчета размерных цепей

Метод полной взаимозаменяемости	Вероятностный метод
Для каждого звена определяют величину единицы точности $[i_i]$	
$i_i = 0,45\sqrt[3]{D} + 0,001D$, при $D \leq 500$	
$i_i = 0,004D + 2,1$, при $D > 500$	
где $D = \sqrt{D_{min} \cdot D_{max}}$ – среднегеометрическое интервала размеров	
Определяют расчётный коэффициент точности	
$K_p = T_\Delta / \sum i_i$	$K_p = T_\Delta / \sqrt{\sum i_i^2}$
По K_p выбирают ближайшее табличное значение коэффициента точности $K_p \rightarrow K_T$	
Определяют допуски на составляющие звенья $T_i = K_T \cdot i_i$, мм	
Проверяют условие	
$T_\Delta \geq \sum T_i$	$T_\Delta \geq \sqrt{\sum T_i^2}$
Если условие не выполнено, пересчитывают допуски на отдельные звенья по более жёсткому (свободному) квалитету, до выполнения условия. Допускаемое отклонение $\pm 5\%$.	
Назначают координаты середин полей допусков составляющих звеньев DC_i . Для охватываемых размеров координаты середины поля допуска определяют по выражению: $DC_i = -T_i/2$, а для охватывающих: $DC_i = +T_i/2$. На размеры, которые не относятся к охватывающим и охватываемым, координаты середин полей допусков назначаются таким образом, чтобы выполнялось условие	
$DC_\Delta = \sum_{i=1}^n \vec{DC}_i - \sum_{i=n+1}^{m-1} \vec{DC}_i$	
Определяют верхние и нижние отклонения размеров	
$ES_i = DC_i + \frac{T_i}{2} \quad EI_i = DC_i - \frac{T_i}{2}$ и	

Переходим к **размерному анализу рулевого устройства** методом полной взаимозаменяемости и вероятностным методом.

Составляем размерную цепь (рисунок 1), для чего определяем замыкающее звено A_Δ , в данном случае это зазор между пяткой ахтерштевня и нижней кромкой пера руля. Выявляем все детали и конструкции (составляющие звенья A_i), влияющие на размер замыкающего звена. Определяем, какие из них являются увеличивающими и уменьшающими, охватывающими и охватываемыми. После чего, приступаем к расчету.

Принимаем, что все детали рулевого устройства изготавливаются на настроенных станках, и поэтому распределение погрешностей подчиняется нормальному закону Гаусса.

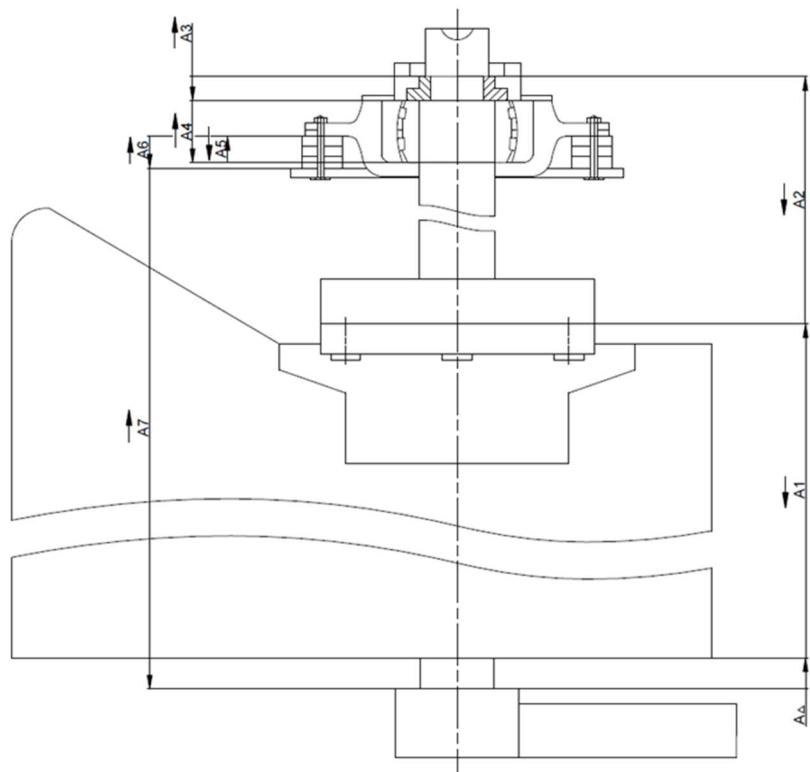


Рисунок 1 – Схема размерной цепи рулевого устройства

Проверяем выполнение основного уравнения размерной цепи:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=A}^n \vec{A}_i - \sum_{i=n+1}^{n-1} \vec{A}_i$$

$$A_{\Delta} = (A_3 + A_4 + A_6 + A_7) - (A_1 + A_2 + A_5) = (50 + 100 + 62 + 4258) - (2750 + 1663 + 50) = 7 \text{ мм.}$$

Равенство верно, следовательно, размерная цепь составлена правильно.

$T_{\Delta} = 6 \text{ мм, } DC_{\Delta} = 0 \text{ мм.}$

Метод полной взаимозаменяемости

Все расчёты сводим в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчет размерной цепи методом полной взаимозаменяемости

Обозначение	Номин. размер	i	Ti (11)		Ti	DC _i	ES	EI
			100	160				
<u>A₁</u>	-2750,00	13,32	1,33	2,13	2,14	-1,07	0,00	-2,14
<u>A₂</u>	-1663,00	9,26	0,93	1,48	0,92	0,57	1,03	0,11
<u>A₃</u>	50,00	1,86	0,19	0,30	0,30	-0,15	0,00	-0,30
<u>A₄</u>	100,00	2,17	0,22	0,35	0,34	-0,17	0,00	-0,34
<u>A₅</u>	-50,00	1,86	0,19	0,30	0,18	0,09	0,18	0,00
<u>A₆</u>	62,00	1,86	0,19	0,30	0,18	-0,09	0,00	-0,18
<u>A₇</u>	4258,00	19,99	2,00	3,20	2,00	0,00	1,00	-1,00
<u>A_Δ</u>	7,00	119,24						
Σ	7,00	50,32	5,03	8,05	6,06	0,00		

1. Для каждого размера из таблицы 2 определяем величину единицы точности [i_i]

$$i_i = 0,45\sqrt[3]{D} + 0,001D, \text{ при } D \leq 500$$

$$i_i = 0,004D + 2,1, \text{ при } D > 500$$

2. Определяем расчётный коэффициент точности

$$K_p = \frac{T_\Delta}{\sum i} = \frac{6000}{50,32} = 119,24.$$

3. По K_p выбираем ближайшее табличное значение коэффициента точности $K_T = 100$, что соответствует 11 квалитету (таблица 3).

4. Определяем допуски на составляющие звенья $T_i = K_T \cdot i_i$, мм.

5. Проверяем условие $T_\Delta \geq \sum T_i$; $6 \geq 5,03$ – условие не выполнено, т. к. допускаемое отклонение не должно превышать $\pm 5\%$, чтобы максимально использовать допуск замыкающего звена. Пересчитываем допуски, по менее жёсткому 12 квалитету на звено A_1 , чтобы выполнилось условие.

Таблица 3 – Табличное значение коэффициента точности

квалитет	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
K	7	10	16	25	40	64	100	160	250	400	640	1000	1600

6. Проверяем условие $T_\Delta \geq \sum T_i$; $6 \geq 6,06$ – условие выполнено.

7. Назначаем координаты середин полей допусков составляющих звеньев DC_i . Для охватываемых размеров координаты середины поля допуска определяют по выражению: $DC_i = -T_i/2$, а для охватывающих: $DC_i = +T_i/2$. На размеры, которые не относятся к охватывающим и охватываемым, координаты середин полей допусков назначаются таким образом, чтобы выполнялось условие

$$DC_\Delta = \sum_{i=1}^n DC_i - \sum_{i=n+1}^{m-1} DC_i. \quad (3)$$

Из рисунка 1 находим, что охватываемыми звеньями являются: A_1, A_3, A_4, A_6 , к охватывающим звеньям относится звено: A_5 , не относящимся к охватывающим и охватываемым звеньям являются звенья: A_2, A_7 .

Подставим полученные значения в уравнение (3):

$$DC_\Delta = [DC_3 + DC_4 + DC_6 + DC_7] - [DC_1 + DC_2 + DC_5];$$

$$0 = [(-0,15) + (-0,17) + (-0,09) + DC_7] - [(-1,07) + DC_2 + 0,09];$$

$$DC_2 - DC_7 = 0,57$$

Назначим $DC_2 = 0,57$, $DC_7 = 0$

$0 = 0$ – условие выполнено.

8. Определяем верхние и нижние отклонения $ES_i = DC_i + \frac{T_i}{2}$ и $EI_i = DC_i - \frac{T_i}{2}$.

Метод вероятностный

Все расчеты сводим в таблицу 4.

Таблица 4 – Расчет размерной цепи вероятностным методом

Обозн.	Номин. размер	i^2	T_i		T_i		DC_i	ES	EI
			(13)	250	(12)	160			
<u>A_1</u>	-2750,00	177,42	3,33	11,09	2,13	4,54	4,54	2,14	-1,07
<u>A_2</u>	-1663,00	85,75	2,32	5,36	1,48	2,20	5,36	2,32	0,11
<u>A_3</u>	50,00	3,46	0,47	0,22	0,30	0,09	0,22	0,46	-0,23
<u>A_4</u>	100,00	4,71	0,54	0,29	0,35	0,12	0,29	0,54	-0,27
<u>A_5</u>	-50,00	3,46	0,47	0,22	0,30	0,09	0,22	0,46	0,23
<u>A_6</u>	62,00	3,46	0,47	0,22	0,35	0,12	0,22	0,46	-0,23
<u>A_7</u>	4258,00	399,60	5,00	24,98	0,30	0,09	24,98	5,00	0,00
A_Δ	7,00	230,45							
Σ	7,00	677,86		6,51		2,69	5,98		0,00

1. Определяем величину единицы точности $[t^2]$.

2. Определяем расчётный коэффициент точности

$$K_p = \frac{T_\Delta}{\sqrt{\sum t^2}} = \frac{6000}{\sqrt{677,86}} = 230,45.$$

3. Ближайшее табличное значение $K_T = 250$, что соответствует 13 квалитету (таблица 3).

4. Определяем допуски на составляющие звенья $T_i = K_T \cdot t_i$.

5. Проверяем условие $T_\Delta \geq \sqrt{\sum T_i^2}$; $6 \geq 6,51$ – условие не выполнено, т. к. допускается отклонение $\pm 5\%$. Пересчитываем допуски, по более жёсткому 12 квалитету на звено A_1 , чтобы выполнилось условие.

6. Проверяем условие $T_\Delta \geq \sum T_i$; $6 \geq 5,98$ – условие выполнено.

7. Назначаем координаты середин полей допусков составляющих звеньев DC_i

Подставим полученные значения из таблицы 4 в уравнение (3):

$$DC_\Delta = [DC_3 + DC_4 + DC_6 + DC_7] - [DC_1 + DC_2 + DC_5];$$

$$0 = [(-0,23) + (-0,27) + (-0,23) + DC_7] - [(-1,07) + DC_2 + 0,23];$$

$$DC_2 - DC_7 = 0,11$$

Назначим $DC_2 = 0,11$, $DC_7 = 0$

$0 = 0$ – условие выполнено.

8. Определяем верхние и нижние отклонения $ES_i = DC_i + \frac{T_i}{2}$ и $EI_i = DC_i - \frac{T_i}{2}$

Заключение

Представленная методика расчета размерной цепи [7, 8, 9] судового рулевого устройства позволяет сделать вывод, что при расчете вероятностным методом, допуски составляющих звеньев получаются по более свободному квалитету, чем при методе полной взаимозаменяемости и как следствие, способствуют удешевлению производства элементов рулевого устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко В. А. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: учебное пособие для студентов технических специальностей / В. А. Карпенко, Н. А. Волошина, С. П. Волков. - Севастополь: Издательство Севастопольского национального технического университета, 2007. - 370 с.: ил.
2. Мочалов, В.Д. Метрология, стандартизация и сертификация. Основы взаимозаменяемости : учебное пособие / В. Д. Мочалов, А. А. Погонин, А. А. Афанасьев. - 2-е изд., стер. - Москва : ИНФРА-М, 2020. - 264 с.
3. Метрология, стандартизация и взаимозаменяемость : учебник / С.Б. Тарасов, С.А. Любомудров, Т.А. Макарова [и др.]. - Москва : ИНФРА-М, 2019. - 337 с
4. Перепадя, К. В. Построение обводов лекал сборочной постели / К. В. Перепадя, М. Г. Балашов, Г. В. Лекарев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 5(361). – С. 171-178. – DOI 10.33979/2073-7408-2023-361-5-171-178. – EDN MRBKDZ.
5. Аникеева, О. В. Иерархическая система размерных связей в металлорежущих станках / О. В. Аникеева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 6(326). – С. 42-51. – EDN YOGOJB.
6. Применение размерного анализа для расчета суммарного отклонения от соосности манжеты относительно вала / М. Н. Ерохин, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. – № 6. – С. 61-67. – DOI 10.31857/S0235711921060067. – EDN ITEXLG.
7. Леонов, О. А. Размерный анализ / О. А. Леонов, Ю. Г. Вергазова. – Москва : Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. – 147 с. – DOI 10.34677/. – EDN XBJNTD.
8. Гуляренко, А. А. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения : учебное пособие / А. А. Гуляренко. - Астана : КазАТИУ, 2021. - 204 с. - ISBN 987-601-257-324-4. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/233906>.
9. Бабюк, Г. Ф. Взаимозаменяемость. Нормирование точности. Размерный анализ в машиностроении : учебное пособие / Г. Ф. Бабюк. - Тюмень : ТИУ, 2018. - 154 с. - ISBN 978-5-9961-1845-8. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/138235> (дата обращения: 14.09.2025). - Режим доступа: для авториз. пользователей.

Перепадя Константин Васильевич

Севастопольский государственный университет, г.
Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Океанотехника и инновационное судостроение»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Ph.: +7(978) 514-34-10
E-mail: kvperepadya@sevsu.ru

Лекарев Геннадий Викторович

Севастопольский государственный университет, г.
Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Океанотехника и инновационное судостроение»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Ph.: +7(978) 103-80-88
E-mail: gvlek59@mail.ru

Балашов Михаил Георгиевич

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Океанотехника и инновационное судостроение» 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Ph.: +7(978) 838-27-60
E-mail: 79788382760@yandex.ru

Левчук Никита Александрович

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Студент кафедры «Океанотехника и инновационное судостроение» 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Ph.: +7(978) 528-76-04
E-mail: xcombo012@gmail.com

PEREPADYA K.V., LEKAREV G.V., BALASHOV M.G., LEVCHUK N.A.

THE METHOD OF DIMENSIONAL ANALYSIS OF THE SHIP'S STEERING DEVICE

Abstract. Dimensional analysis is widely used to solve the problems of ensuring the accuracy of manufacturing parts, assembly and installation of ship structures and mechanisms.

Keywords: dimensional chain, handlebar pen, steering gear

BIBLIOGRAPHY

1. Karpenko V. A. Interchangeability, standardization and technical measurements: a textbook for students of technical specialties / V. A. Karpenko, N. A. Voloshina, S. P. Volkov. - Sevastopol: Publishing House of Sevastopol National Technical University, 2007. - 370 p.: ill.
2. Mochalov, V. D. Metrology, standardization and certification. Fundamentals of interchangeability: a textbook / V. D. Mochalov, A. A. Pogonin, A. A. Afanasyev. - 2nd ed., reprinted - Moscow: INFRA-M, 2020. - 264 p.
3. Metrology, standardization and interchangeability: a textbook / S. B. Tarasov, S. A. Lyubomudrov, T. A. Makarova [et al.]. - Moscow: INFRA-M, 2019. - 337 p.
4. Perepadya, K. V. Construction of contours of assembly bed patterns / K. V. Perepadya, M. G. Balashov, G. V. Lekarev // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2023. - No. 5 (361). - P. 171-178. - DOI 10.33979/2073-7408-2023-361-5-171-178. - EDN MRBKDZ.
5. Anikeeva, O. V. Hierarchical system of dimensional relationships in metal-cutting machines / O. V. Anikeeva // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2017. - No. 6 (326). - P. 42-51. - EDN YOGOJB.
6. Application of dimensional analysis to calculate the total deviation from the coaxiality of the cuff relative to the shaft / M. N. Erokhin, O. A. Leonov, N. Zh. Shkaruba [et al.] // Problems of mechanical engineering and machine reliability. - 2021. - No. 6. - P. 61-67. - DOI 10.31857 / S0235711921060067. - EDN ITEXLG.
7. Leonov, O. A. Dimensional analysis / O. A. Leonov, Yu. G. Vergazova. - Moscow: Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2020. - 147 p. - DOI 10.34677 /. - EDN XBJHTD.
8. Gulyarenko, A. A. Interchangeability, standardization and technical measurements: a textbook / A. A. Gulyarenko. - Astana: KAZATIU, 2021. - 204 p. - ISBN 987-601-257-324-4. - Text: electronic // Lan: electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/233906>.
9. Babyuk, G. F. Interchangeability. Standardization of accuracy. Dimensional analysis in mechanical engineering: a textbook / G. F. Babyuk. - Tyumen: TIU, 2018. - 154 p. - ISBN 978-5-9961-1845-8. - Text: electronic // Lan: electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/138235> (accessed: 14.09.2025). - Access mode: for authorized users.

Perepadya Konstantin Vasilovich

Sevastopol State University, Sevastopol
Ph.D., assistant professor of Department of Ocean Engineering and Shipbuilding
299053, Sevastopol, Universitetskaya street, 33
Ph.: +7(978) 514-34-10
E-mail: kvperepadya@sevsu.ru

Lekarev Gennadiy Viktorovich

Sevastopol State University, Sevastopol
Ph.D., assistant professor of Department of Ocean Engineering and Shipbuilding
299053, Sevastopol, Universitetskaya street, 33
Ph.: +7(978) 103-80-88
E-mail: gvlek59@mail.ru

Balashov Michael Georgievich

Sevastopol State University, Sevastopol
Ph.D., assistant professor of Department of Ocean Engineering and Shipbuilding
299053, Sevastopol, Universitetskaya street, 33
Ph.: +7(978) 838-27-60
E-mail: 79788382760@yandex.ru

Levchuk Nikita Aleksandrovich

Sevastopol State University, Sevastopol
student of Department of Ocean Engineering and Shipbuilding
299053, Sevastopol, Universitetskaya street, 33
Ph.: +7(978) 528-76-04
E-mail: xcombo012@gmail.com

ПОЛЯКОВ А.М., БУГАЕВ П.А., КОЛЕСОВ М.А.

АКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ МНОГОЗВЕННЫХ ШАРНИРНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Аннотация. Несмотря на то, что теория шарнирных многозвенных механизмов достаточно подробно изучена и описана во многих литературных источниках, решение практических задач в этой области весьма трудоемко в связи с их нелинейностью и масштабностью. Поэтому вплоть до настоящего времени при решении задач анализа и синтеза многозвенных механизмов чаще всего используют графоаналитические методы, не распространяющиеся на механизмы с избыточными связями, а проблемы планирования движений механизмов с несколькими степенями свободы изучены пока что лишь фрагментарно. В то же время, современное состояние технических и программных средств позволяет качественно изменить подход к решению таких задач на новой методологической основе – с использованием численно-аналитических методов. В данной работе приведены частные примеры численно-аналитического подхода к решению задач механики шарнирных многозвенных механизмов последовательной и параллельной структуры без избыточных связей. Полученные результаты могут быть использованы для обобщения теории и методов решения прикладных задач шарнирных механизмов, ориентированных на использование современных программных средств и искусственного интеллекта.

Ключевые слова: механика механизмов, шарнирный механизм, кинематическая модель механизма, численно-аналитические методы, искусственный интеллект.

Введение

Одно из общепринятых определений механизма указывает на то, что это система подвижно связанных абсолютно твердых тел (звеньев), в которой заданное движение одного или нескольких из них преобразуется в требуемые движения других тел [1,2]. Под числом степеней свободы понимают число независимых чисел (параметров), однозначно определяющих расположение звеньев механизма в пространстве по отношению к базовой системе координат. Данная работа посвящена исследованию шарнирных механизмов с одной степенью свободы без избыточных связей на современной методологической основе. В дальнейшем, приведенные здесь результаты будут обобщены на подмножества механизмов с конечным числом степеней свободы и с устранимыми структурно и кинематически избыточными связями.

Хорошо известно, что механизмы находят широкое применение в машиностроении и приборостроении. Их теория, включающая фундаментальные основы описания структуры, кинематики и динамики, детально разработана на разных уровнях. В то же время, методология решения ряда задач механики механизмов требует дополнительного изучения, уточнения и модификации, что особенно важно с учетом развития современных вычислительных технологий и приводных устройств, позволяющих программно реализовать сложные законы вращательных и поступательных движений рабочих органов. Необходимо также отметить, что в настоящее время, несмотря на развитие мехатронных систем с относительно простой механической структурой, все еще существует необходимость решения широкого круга задач, в которых использование системы множества подвижно связанных тел – механизмов, если не обязательно, то, как минимум, желательно по разным причинам. Не конкретизируя эти задачи, отметим, что для их решения необходимо разработать современные эффективные вычислительные процедуры, опираясь на развитые программные среды, такие, как Matlab, Maple, Mathematica и другие [3], а также на технологии искусственного интеллекта [4]. По существу, эти методы в большинстве случаев не приведут к изменению основ теории шарнирных механизмов, но позволят более полно и качественно решать множество ранее недоступных или очень трудоемких задач. Целью данной работы является формирование новых методологических основ механики многозвенных шарнирных механизмов и численно-аналитических методов решения задач их анализа, синтеза и планирования движений.

Кинематические передаточные функции. Матрица Якоби и якобиан механизма

В многозвенном механизме с одной степенью свободы положение входного звена определим обобщенной координатой $q = q(t)$. Тогда, положение выходного звена будет определяться функциональной зависимостью [5]

$$q_k = q_k(q, t), \quad (1)$$

называемой функцией положения (при условии, что выходное звено жестко связано с рабочим органом) или кинематической передаточной функцией механизма нулевого порядка.

После дифференцирования (1) по t будем иметь:

$$\frac{dq_k}{dt} = \dot{q}_k = \frac{dq_k}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = q'_k \cdot \dot{q}, \quad (2)$$

где

$$q'_k = \frac{dq_k}{dq}, \quad (3)$$

– кинематическая передаточная функция механизма 1-го порядка (ее еще называют аналогом скорости).

Эту функцию можно считать собственной характеристикой механизма, т. к. она явно не зависит от времени и от закона движения входного звена и определяет его уникальные кинематические особенности. Путем интегрирования (3) по q , можно восстановить функцию положения механизма (1), а путем дифференцирования по q – получить кинематическую передаточную функцию механизма 2-го порядка (аналог ускорения):

$$q''_k = \frac{d^2 q_k}{dq^2}. \quad (4)$$

Смысл функции (4) становится более понятным, если ее получить путем дифференцирования (2) по времени t :

$$\frac{d^2 q_k}{dt^2} = \ddot{q}_k = q''_k \cdot \dot{q}^2 + q'_k \cdot \ddot{q}. \quad (5)$$

Интегрируя (5) по q , с учетом постоянной, получим аналог скорости (3), а после вторичного интегрирования – функцию положения (1). Таким образом, все три кинематические передаточные функции связаны друг с другом, и, зная одну из них, всегда можно получить две других. Однако для того, чтобы определиться какая из этих функций первична, нужно понимать какой механизм исследуется (проектируется): позиционный или функциональный [1].

Функция положения механизма полностью определяется связями, накладываемыми на относительные движения звеньев, поэтому для ее определения используют кинематическую схему, в которой явно указываются все метрические параметры механизма и характер кинематических пар, образуемых звеньями. На простейшем примере шарнирного четырехзвенника, кинематическая схема которого приведена на рисунке 1, покажем, как на ее основе определяется функция положения механизма.

Предположим, что звено 1 является входным, а звено 3 – выходным. Тогда функция положения механизма имеет вид

$$\varphi_3 = \varphi_3(\varphi_1, t). \quad (6)$$

Для ее определения воспользуемся методом замкнутых векторных контуров и составим векторное равенство:

$$\vec{z}_1 + \vec{z}_2 = \vec{z}_0 + \vec{z}_3, \quad (7)$$

где $\vec{z}_k, k = 0..3$ – векторы, ассоциированные с кинематической схемой, указанные на рисунке 1.

Для плоской кинематической цепи эти векторы формально можно представлять как комплексные числа типа $\vec{z}_k \sim z_k = a_k + i b_k$, где $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, a_k и b_k – проекции вектора \vec{z}_k на оси x и y , соответственно. Тогда равенство (7) можно представить в следующем виде:

$$l_1 \cos \varphi_1 + i l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + i l_2 \sin \varphi_2 = l_0 + l_3 \cos \varphi_3 + i l_3 \sin \varphi_3, \quad (8)$$

где $l_k, \varphi_k, k = 0..3$ – длины и углы поворота звеньев, соответственно.

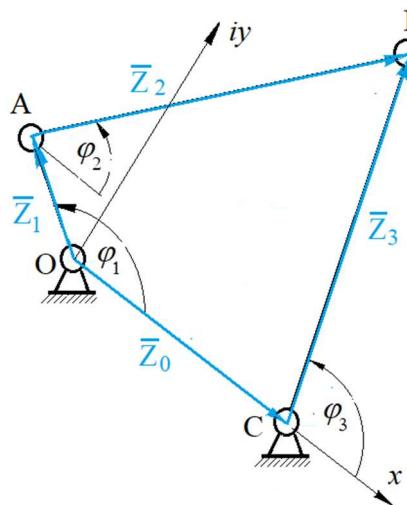


Рисунок 1 – Кинематическая схема шарнирного четырехзвенника

Приравнивая действительные и мнимые части в (8), получим систему двух нелинейных уравнений

$$\begin{cases} l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 = l_0 + l_3 \cos \varphi_3, \\ l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 = l_3 \sin \varphi_3. \end{cases} \quad (9)$$

Использованный подход очень удобен с точки зрения формализации процедуры вывода уравнений связей плоских механизмов. В случае пространственных кинематических цепей он может быть обобщен путем использования кватернионов вместо комплексных чисел.

Решение системы (9) позволяет получить функции положения звеньев 2 и 3:

$\varphi_2 = \varphi_2(\varphi_1, t)$ (функция положения шатуна 2) и $\varphi_3 = \varphi_3(\varphi_1, t)$ (функция положения механизма – коромысла 3).

Необходимо отметить, что для многозвенных механизмов уравнения геометрических связей типа (9) определяют с использованием независимых замкнутых контуров, которые могут быть составлены для конкретной кинематической цепи [6]. При этом число независимых уравнений связей должно быть равно числу неизвестных параметров кинематической цепи.

Исключив параметр φ_2 из (9), получим следующее уравнение

$$A + B \cos \varphi_3 + C \sin \varphi_3 = 0, \quad (10)$$

где $A = l_0^2 + l_1^2 + l_3^2 - l_2^2 - 2l_0l_1 \cos \varphi_1$, $B = -2l_3(l_1 \cos \varphi_1 - l_0)$, $C = -2l_1l_3 \sin \varphi_1$.

Учитывая основное тригонометрическое тождество, уравнение (10) представим в следующем виде

$$(B^2 + C^2) \cos^2 \varphi_3 + 2AB \cos \varphi_3 + A^2 + C^2 = 0,$$

решая которое, получим [7]

$$\cos \varphi_3 = \frac{-AB \pm C\sqrt{D}}{B^2 + C^2}, \quad (11)$$

а после элементарных преобразований

$$\sin \varphi_3 = \frac{-A \pm B\sqrt{D}}{B^2 + C^2}, \quad (12)$$

где $D = B^2 + C^2 - A^2$.

Можно показать, что $\forall \varphi_1 \in \mathbb{R}$ при $D \geq 0$, справедливы следующие неравенства [7]:

$$|-AB \pm C\sqrt{D}| \leq B^2 + C^2 \text{ и } |-AC \pm B\sqrt{D}| \leq B^2 + C^2.$$

Т.е., в таких случаях функция положения (6) будет непрерывной, а приведенные неравенства могут быть использованы для доказательства необходимых условий проворачиваемости кривошипа [7]. Но для доказательства достаточных условий необходимо использовать другой подход [8]. Для достижения этой цели продифференцируем уравнения (9) по обобщенной координате φ_1 . Получим

$$\begin{cases} l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 \cdot \varphi'_2 = l_3 \sin \varphi_3 \cdot \varphi'_3 \\ l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 \cdot \varphi'_2 = l_3 \cos \varphi_3 \cdot \varphi'_3, \end{cases}$$

или в матричной форме

$$\mathfrak{I} \cdot \mathcal{F} = \mathcal{B}, \quad (13)$$

где $\mathfrak{J} = \begin{pmatrix} -l_2 \sin \varphi_2 & l_3 \sin \varphi_3 \\ -l_2 \cos \varphi_2 & l_3 \cos \varphi_3 \end{pmatrix}$ – матрица Якоби механизма, $\mathcal{F} = \begin{pmatrix} \varphi'_2 \\ \varphi'_3 \end{pmatrix}$ и $\mathcal{B} = \begin{pmatrix} l_1 \sin \varphi_1 \\ l_1 \cos \varphi_1 \end{pmatrix}$ – матрицы-столбцы неизвестных (аналогов скоростей) и свободных членов, соответственно.

Именно матрица Якоби \mathfrak{J} фактически является собственной характеристикой механизма и определяет его передаточные особенности, в том числе, кинематические передаточные функции звеньев первого порядка. Если якобиан механизма $\det(\mathfrak{J})$ не обращается в нуль на области определения функции положения, кинематическая передаточная функция первого порядка механизма является непрерывной и дифференцируемой в этой области. В тех случаях, когда $\det(\mathfrak{J}) = 0$ механизм мгновенно приобретает дополнительную степень свободы или же теряет существующую. Такие конфигурации называют особыми или сингулярными и в них кинематические передаточные функции первого порядка не определены.

Эти свойства якобиана могут быть использованы на этапах синтеза метрических параметров механизма. Так, например, в [7] на основе анализа якобиана шарнирного четырехзвенника и его сингулярных конфигураций доказывается важная теорема Грасгофа и определяются условия проворачиваемости механизма.

Методология аналитического исследования механики шарнирных механизмов, продемонстрированная выше на простом примере, может быть использована не только для анализа, но и для синтеза шарнирных механизмов гораздо более сложной структуры. Одной из ее важных особенностей является возможность формализации и, как следствие, упрощения программного кода решения задачи с использованием различных вычислительных платформ.

Многозвенные шарнирные механизмы развитой структуры

Рассмотрим теперь механизм более сложной структуры – с двумя группами Ассура 2-го класса – кинематическая схема которого показана на рисунке 2.

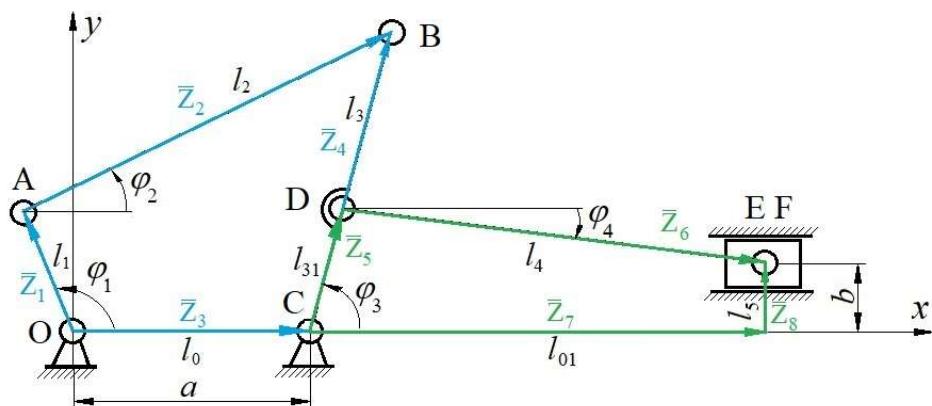


Рисунок 2 – Кинематическая схема шарнирного механизма с двумя группами Ассура 2-го класса

Для этого механизма могут быть составлены два независимых замкнутых векторных контура, представляемые системой двух векторных уравнений

$$\begin{cases} \vec{z}_1 + \vec{z}_2 = \vec{z}_0 + \vec{z}_3 \\ \vec{z}_{31} + \vec{z}_4 = \vec{z}_5 \end{cases}$$

или системой четырех нелинейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 = a + l_3 \cos \varphi_3 \\ l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 = -b + l_3 \sin \varphi_3 \\ l_{31} \cos \varphi_3 + l_4 \cos \varphi_4 = s \\ l_{31} \sin \varphi_3 + l_4 \sin \varphi_4 = c \end{cases} \quad (14)$$

Решение системы (14) может быть получено в системе аналитических вычислений Maple, если в качестве неизвестных принять тригонометрические функции: $cf_i = \cos\varphi_i$, $sf_i = \sin\varphi_i$, и дополнить систему тригонометрическими тождествами: $cf_i^2 + sf_i^2 = 1$, $i = 2,3,4$:

$$\left\{ \begin{array}{l} l_1 \cos\varphi_1 + l_2 \cos\varphi_2 - a - l_3 \cos\varphi_3 = 0 \\ l_1 \sin\varphi_1 + l_2 \sin\varphi_2 + b - l_3 \sin\varphi_3 = 0 \\ l_{31} \cos\varphi_3 + l_4 \cos\varphi_4 - s = 0 \\ l_{31} \sin\varphi_3 + l_4 \sin\varphi_4 - c = 0 \\ cf_2^2 + sf_2^2 = 1 \\ cf_3^2 + sf_3^2 = 1 \\ cf_4^2 + sf_4^2 = 1 \end{array} \right. . \quad (15)$$

Система уравнений связей (15) гораздо сложней системы (6) и ее аналитическое решение, в принципе, возможно, но с практической точки зрения представляет небольшую значимость из-за его громоздкости и, следовательно, сложной интерпретации. Гораздо большую важность имеют простые численные решения этой системы, представляемые в табличной или графической формах (если они возможны при конкретных кинематических параметрах), а также информация о возможных сингулярных конфигурациях, свойственных механизму, имеющему данную структуру.

Тем не менее, в системе аналитических вычислений (САВ) Maple аналитические решения системы (15) могут быть получены достаточно просто с использованием встроенной функции `solve({eq1,eq2,...,eqk},{x1,x2,...,xk})`. Но их практически невозможно интерпретировать вследствие чрезвычайной громоздкости. В то же время полученные таким образом решения в САВ Maple могут быть проинтегрированы с целью получения кинематических передаточных функций первого и второго порядка. Однако представление всех передаточных функций даже в этом случае рекомендуется выполнять в табличной или же графической формах [9].

В качестве примера на рисунке 3 показаны графики кинематических передаточных функций механизма (ползуна 5), а на рисунке 4 – соответствующие графики кинематических передаточных функций коромысла 3, полученные в САВ Maple. Аналогичным образом могут быть также получены и представлены кинематические передаточные функции шатунов 2 и 4.

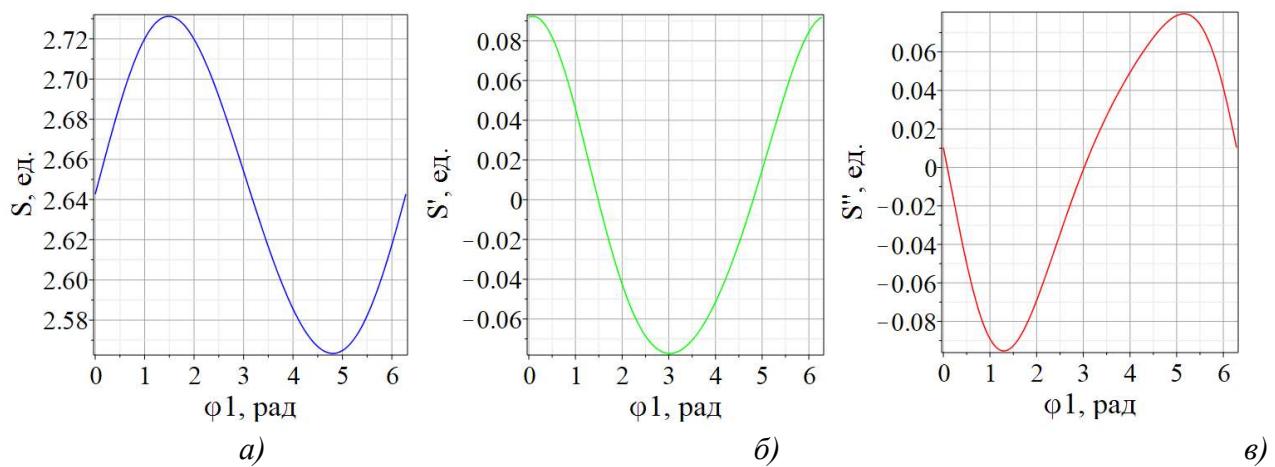


Рисунок 3 – Кинематические передаточные функции механизма с двумя группами Ассура 2-го порядка:

$$a) \text{функция положения } s = s(\varphi_1); \quad b) \text{аналог скорости } s' = \frac{ds}{d\varphi_1}; \quad c) \text{аналог ускорения } s'' = \frac{d^2s}{d\varphi_1^2}$$

Для получения матрицы Якоби механизма продифференцируем уравнения системы (14) по обобщенной координате φ_1 . Получим систему

$$\left\{ \begin{array}{l} -l_2 \sin\varphi_2 \cdot \varphi'_2 + l_3 \sin\varphi_3 \cdot \varphi'_3 = l_1 \sin\varphi_1 \\ l_2 \cos\varphi_2 \cdot \varphi'_2 - l_3 \cos\varphi_3 \cdot \varphi'_3 = -l_1 \cos\varphi_1 \\ -l_{31} \sin\varphi_3 \cdot \varphi'_3 - l_4 \sin\varphi_4 \cdot \varphi'_4 = s' \\ l_{31} \cos\varphi_3 \cdot \varphi'_3 + l_4 \cos\varphi_4 \cdot \varphi'_4 = 0 \end{array} \right.$$

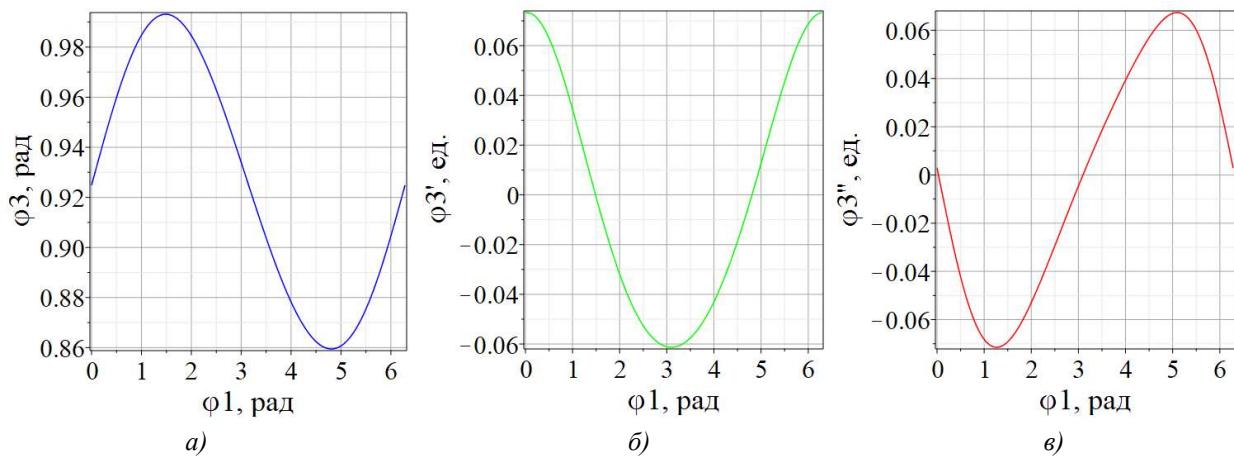


Рисунок 4 – Кинематические передаточные функции коромысла 3 механизма с двумя группами Ассура 2-го порядка: а) функция положения $\varphi_3 = \varphi_3(\varphi_1)$; б) аналог скорости $\varphi_3' = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1}$; в) аналог ускорения $\varphi_3'' = \frac{d^2\varphi_3}{d\varphi_1^2}$

которая в матричном виде представляется в виде

$$\begin{pmatrix} -l_2 \sin \varphi_2 & l_3 \sin \varphi_3 & 0 & 0 \\ l_2 \cos \varphi_2 & -l_3 \cos \varphi_3 & 0 & 0 \\ 0 & l_{31} \sin \varphi_3 & l_4 \sin \varphi_4 & 1 \\ 0 & l_{31} \cos \varphi_3 & l_4 \cos \varphi_4 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_2' \\ \varphi_3' \\ \varphi_4' \\ S' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 \sin \varphi_1 \\ -l_1 \cos \varphi_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

или

$$\text{где } \mathfrak{J}_1 = \begin{pmatrix} -l_2 \sin \varphi_2 & l_3 \sin \varphi_3 & 0 & 0 \\ l_2 \cos \varphi_2 & -l_3 \cos \varphi_3 & 0 & 0 \\ 0 & l_{31} \sin \varphi_3 & l_4 \sin \varphi_4 & 1 \\ 0 & l_{31} \cos \varphi_3 & l_4 \cos \varphi_4 & 0 \end{pmatrix} - \text{матрица Якоби механизма, } \mathcal{F}_1 = \begin{pmatrix} \varphi_2' \\ \varphi_3' \\ \varphi_4' \\ S' \end{pmatrix} \text{ и}$$

$$\mathcal{B}_1 = \begin{pmatrix} l_1 \sin \varphi_1 \\ -l_1 \cos \varphi_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \text{матрицы-столбцы неизвестных (кинематических передаточных функций}$$

первого порядка звеньев механизма) и свободных членов, соответственно.

Чтобы обеспечить возможность формулировки обобщенных выводов, касающихся аналитической механики многозвенных шарнирных механизмов развитой структуры, рассмотрим механизм с группой Ассура 3-го класса, кинематическая схема которого показана на рисунке 5.

Для этого механизма также можно составить два независимых замкнутых векторных контура

$$\begin{cases} \vec{z}_1 + \vec{z}_2 + \vec{z}_3 = \vec{z}_0 + \vec{z}_4 \\ \vec{z}_4 + \vec{z}_5 = \vec{z}_6 + \vec{z}_7 \end{cases} \quad (17)$$

которым соответствует система четырех нелинейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3 = a + l_4 \cos \varphi_4 \\ l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin \varphi_3 = -b + l_4 \sin \varphi_4 \\ l_4 \cos \varphi_4 + l_5 \cos(\varphi_3 - \alpha) + l_6 \cos \varphi_6 = -c \\ l_4 \sin \varphi_4 + l_5 \sin(\varphi_3 - \alpha) + l_6 \sin \varphi_6 = d \end{cases}, \quad (18)$$

где a, b, c, d – постоянные кинематические параметры механизма, показанные на рисунке 5; $\varphi_i, i = 1, \dots, 6$ – углы поворота звеньев, отсчитываемые от положительного направления оси x , до линии расположения соответствующего звена против хода часовой стрелки. Угол φ_5 в системе (18) не используется, так как он определяется в зависимости от угла φ_3 , т. е., $\varphi_5 = \varphi_3 - \alpha$. Таким образом, неизвестными в системе (18) являются четыре функции положения: $\varphi_k, k = 2,3,4,6$, которые могут быть достаточно легко определены, как и при решении предыдущей задачи.

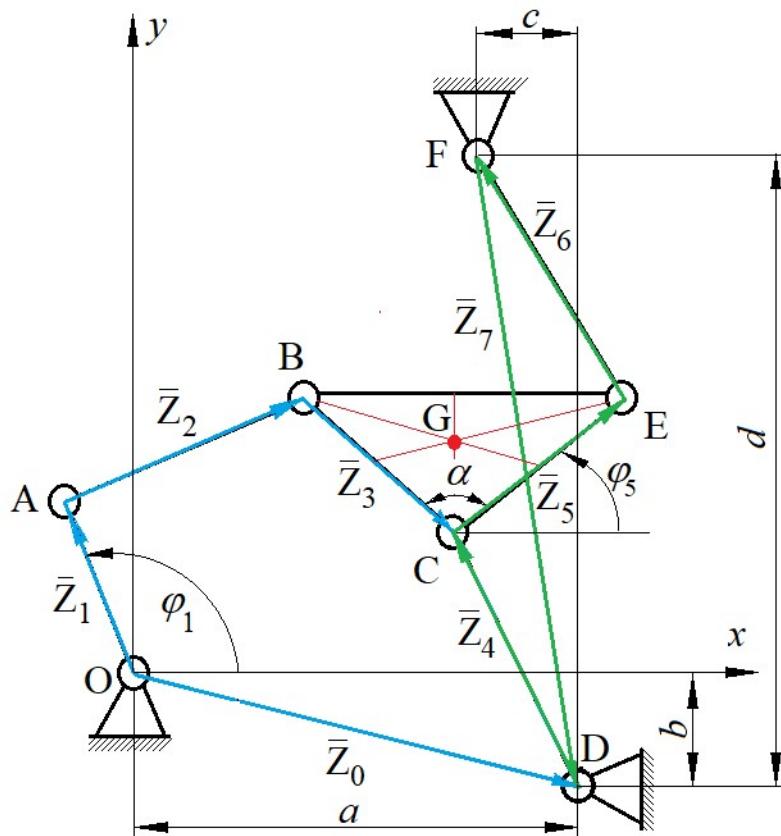


Рисунок 5 – Кинематическая схема механизма 3-го класса

После дифференцирования обеих частей уравнений системы (18) по φ_1 , получим

$$\begin{cases} -l_2 \sin \varphi_2 \cdot \varphi'_2 - l_3 \sin \varphi_3 \cdot \varphi'_3 + l_4 \sin \varphi_4 \cdot \varphi'_4 = l_1 \sin \varphi_1 \\ l_2 \cos \varphi_2 \cdot \varphi'_2 + l_3 \cos \varphi_3 \cdot \varphi'_3 - l_4 \cos \varphi_4 \cdot \varphi'_4 = -l_1 \cos \varphi_1 \\ l_5 \sin(\varphi_3 - \alpha) \cdot \varphi'_3 + l_4 \sin(\varphi_4) \cdot \varphi'_4 + l_6 \sin(\varphi_6) \cdot \varphi'_6 = 0 \\ l_5 \cos(\varphi_3 - \alpha) \cdot \varphi'_3 + l_4 \cos(\varphi_4) \cdot \varphi'_4 + l_6 \cos(\varphi_6) \cdot \varphi'_6 = 0 \end{cases}$$

или в матричной форме

$$\mathfrak{J}_2 \cdot \mathcal{F}_2 = \mathcal{B}_2, \quad (19)$$

где $\mathfrak{J}_2 = \begin{pmatrix} -l_2 \sin \varphi_2 & -l_3 \sin \varphi_3 & l_4 \sin \varphi_4 & 0 \\ l_2 \cos \varphi_2 & l_3 \cos \varphi_3 & -l_4 \cos \varphi_4 & 0 \\ 0 & l_5 \sin(\varphi_3 - \alpha) & l_4 \sin(\varphi_4) & l_6 \sin(\varphi_6) \\ 0 & l_5 \cos(\varphi_3 - \alpha) & l_4 \cos(\varphi_4) & l_6 \cos(\varphi_6) \end{pmatrix}$ – матрица Якоби механизма;

$$\mathcal{F}_2 = \begin{pmatrix} \varphi'_2 \\ \varphi'_3 \\ \varphi'_4 \\ \varphi'_6 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \mathcal{B}_2 = \begin{pmatrix} l_1 \sin \varphi_1 \\ -l_1 \cos \varphi_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$
 – матрицы-столбцы неизвестных (кинематических передаточных функций звеньев первого порядка) и свободных членов, соответственно.

Выше было показано, что возможные сингулярные конфигурации механизмов определяются особыми сочетаниями кинематических параметров механизма. В ряде случаев они могут быть определены путем анализа якобиана механизма. В рассматриваемом примере якобиан механизма, вычисленный в САВ Maple, имеет вид, позволяющий явно выявить такие случаи:

$$\det(\mathfrak{J}_2) = -\frac{1}{2} l_2 l_4 l_6 [l_3 (\cos \psi_1 - \cos \psi_1) + l_5 (\cos \psi_3 - \cos \psi_4)], \quad (20)$$

где $\psi_1 = \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4 + \varphi_6$, $\psi_2 = \varphi_2 - \varphi_3 + \varphi_4 - \varphi_6$, $\psi_3 = \alpha - \varphi_2 - \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_6$, $\psi_4 = \alpha + \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4 + \varphi_6$.

Так, например, легко заметить, что сингулярной может быть потенциально возможная конфигурация механизма, в которой $\varphi_2 = \varphi_4 = \varphi_6$. Для определения других сингулярностей необходимо задействовать более совершенные методы анализа якобиана, основанные, например, на обработке большого числа данных с использованием нейронных сетей или искусственного интеллекта. Необходимое множество данных может быть определено путем численного решения системы (18) (прямая задача кинематики) при различных сочетаниях значений кинематических параметров механизма. С целью получения объективной информации пространство кинематических параметров может быть исследовано систематически, например, на основе метода Соболя-Статникова [10], что позволит выявить все возможные сингулярности, соответствующие механизмам данной структуры с наперед заданной точностью. Аналогичный анализ сингулярностей можно проделать и для механизма с заданными кинематическими параметрами с целью определения области допустимых значений обобщенной координаты механизма.

Кинематический синтез многозвенных шарнирных механизмов

Методология численно-аналитического решения прямой задачи кинематики многозвенных шарнирных механизмов, кратко представленная выше, может быть использована не только для решения обратной задачи, в которой по заданному закону движения выходного звена необходимо определить закон движения входного звена, но и для решения множества различных задач структурного и кинематического синтеза механизмов. Для этого могут быть использованы самые разные программные средства (Matlab, Maple, Open Modelica) и вычислительные методы (оптимизация, нейронные сети, промпт-инжиниринг), но объектами их приложения должны быть заданные аналитически уравнения связей механизмов и их аналитические или численные решения.

Предположим, что ставится задача синтеза механизма с шатунной кривой, максимально близкой к заданной. При этом в качестве критерия качества синтеза может быть принято условие:

$$\sum_{i=1}^n \sqrt{\delta_{xi}^2 + \delta_{yi}^2} \leq \delta, \quad (21)$$

где $\delta_{xi} = x_i - x_{i0}$, $\delta_{yi} = y_i - y_{i0}$; $\{x_{i0}, y_{i0}\}$, $\{x_i, y_i\}$ - координаты точек заданной и синтезированной кривой, соответственно; n - число точек кривой, используемой для синтеза.

В качестве примера рассмотрим задачу синтеза шарнирного четырехзвенника (рисунок 1) с желаемой шатунной кривой, удовлетворяющей условию (21) с использованием нейронной сети из пакета MATLAB/Neural Network Toolbox. В данном случае известно аналитическое решение прямой задачи кинематики механизма (9, 11, 12), позволяющее вычислить координаты шатунной кривой (траектории движения центра шатуна 2)

$$\begin{cases} x_c = l_1 \cos \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \cos \varphi_2 \\ x_c = l_1 \sin \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (22)$$

В тех случаях, когда известно численное решение задачи, рассчитанные координаты кривой представляют в табличной форме. Это не приводит к ухудшению условий решения поставленной задачи синтеза, т. к. во всех случаях желаемая шатунная кривая задается в виде дискретного набора координат.

Нейронная сеть, используемая для синтеза механизма, должна быть обучена на некотором множестве данных, которые можно получить путем генерации обучающих примеров. Для этого случайным образом выбираются размеры звеньев механизма $Y_k = [l_{k0}, l_{k1}, l_{k2}, l_{k3}]$ (выход обучаемой нейросети), с учетом которых рассчитывается набор координат соответствующей им шатунной кривой $X_k = [x_{k1}, y_{k1}, x_{k2}, y_{k12}, \dots, x_{kn}, y_{kn}]$ (вход обучаемой нейросети). В Matlab такой датасет удобно хранить в формате .mat, например:

```
save('dataset_fourbar.mat', 'X_input', 'Y_output');
```

где X_{input} – матрица размерности $[2n \times K]$; n – число точек кривой; K – число обучающих примеров; Y_{output} – матрица $[3 \times K]$ (параметры звеньев).

Обучение нейросети производится с использованием инструментов, встроенных в пакет MATLAB/Neural Network Toolbox.

В качестве примера приведем пример синтеза шарнирного четырехзвенного механизма с шатунной кривой, близкой к эллипсу, с использованием многослойного перцептрона прямого распространения (*feedforwardnet*). Параметры сети приведены ниже:

- архитектура: два скрытых слоя по 50 нейронов в каждом;
- функции активации: *tansig* в скрытых слоях, *purelin* на выходе.
- алгоритм обучения: Левенберга–Марквардта (*trainlm*).
- размерность входа: вектор $X_0 = [x_{01}, y_{01}, x_{02}, y_{02}, \dots, x_{k0}, y_{k0}]$, формируемый путем разворачиванием заданной шатунной кривой;
- размерность выхода: 4 числа – длины звеньев механизма $[l_0, l_1, l_2, l_3]$.

Для обучения сети был сгенерирован датасет с использованием аналитического решения прямой задачи кинематики механизма (9, 11, 12). В данном примере использовался набор из 400 обучающих выборок. Для каждой выборки случайным образом выбирались длины звеньев в диапазонах: $l_0 \in [1.0; 3.0]$, $l_1 \in [0.5; 2.5]$, $l_2 \in [2.0; 5.0]$, $l_3 \in [2.0; 5.0]$ и вычислялись координаты центра шатуна в 50 положениях кривошипа φ_1 . Получаемая при этом кривая нормировалась и разворачивалась в вектор длины 100. Таким образом, вход сети представлялся в виде вектора длины 100, а выход – вектором длины 4.

После обучения нейросети в среде MATLAB были получены диагностические графики: Выполнение (Performance – рисунок 6), Состояния обучения (Training states – рисунок 7), Гистограмма ошибок (Error histogram – рисунок 8) и Регрессия (Regression – рисунок 9).

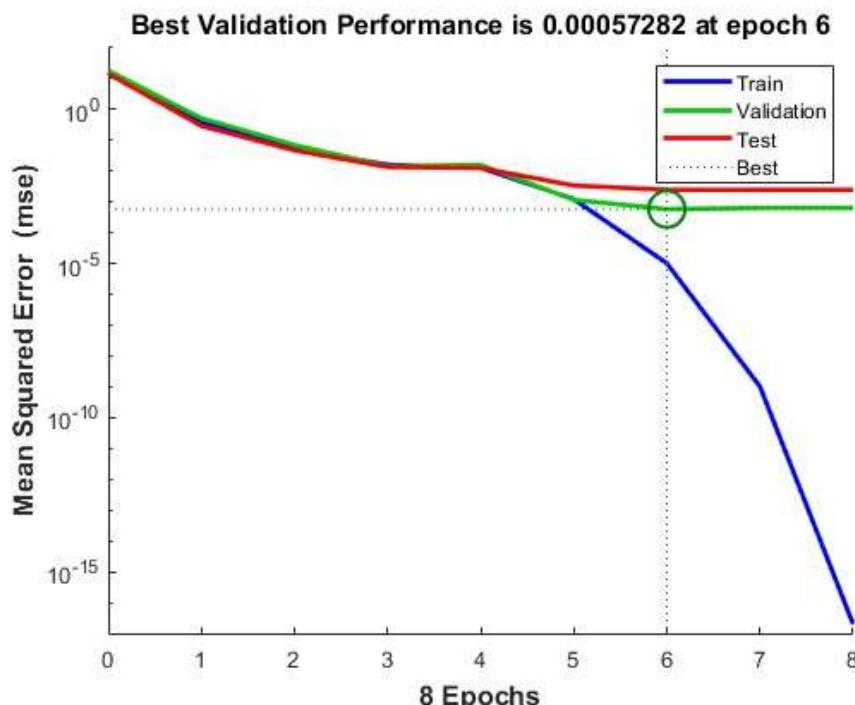


Рисунок 6 – Performance

Из графиков, показанных на рисунках следует, что при обучении ошибка на обучающем и валидационном наборе убывает и стабилизируется (рисунок 6), что свидетельствует о том, что сеть не переобучена; градиент ошибки снижается, параметр M уменьшается, количество «валидационных остановок» невелико (рисунок 7), т. е. процесс обучения нейросети устойчивый; ошибки распределены симметрично относительно нуля, причем большинство в пределах узкого диапазона (рисунок 8), следовательно, сеть обучена и нет смещения данных; коэффициент корреляции $R \approx 0.96 – 0.98$ для всех выборок (рисунок 9), что является свидетельством хорошего предсказания нейросетью длин звеньев, при которых будет реализована шатунная кривая, близкая к желаемой.

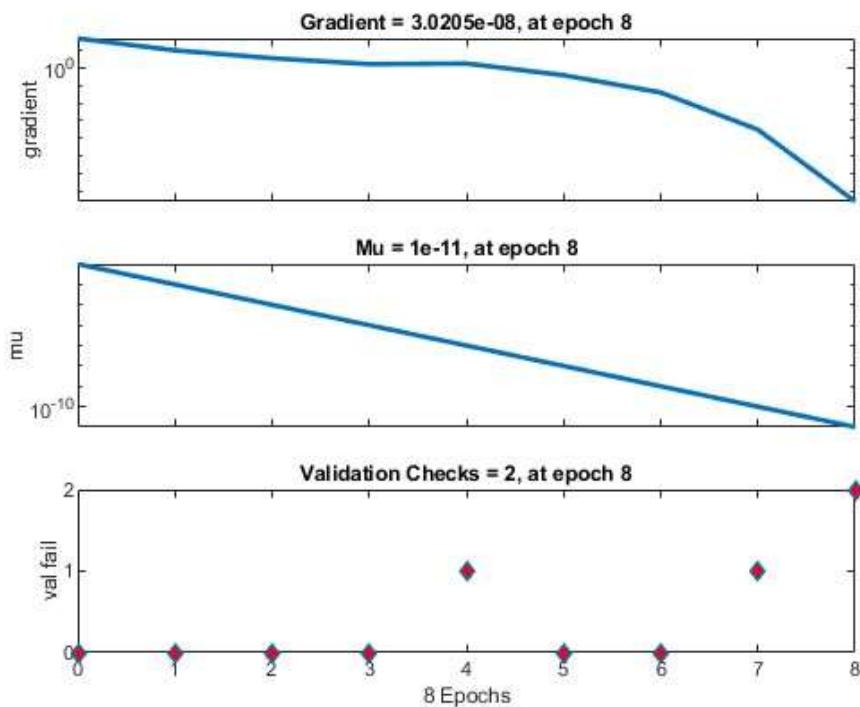


Рисунок 7 – Состояния обучения

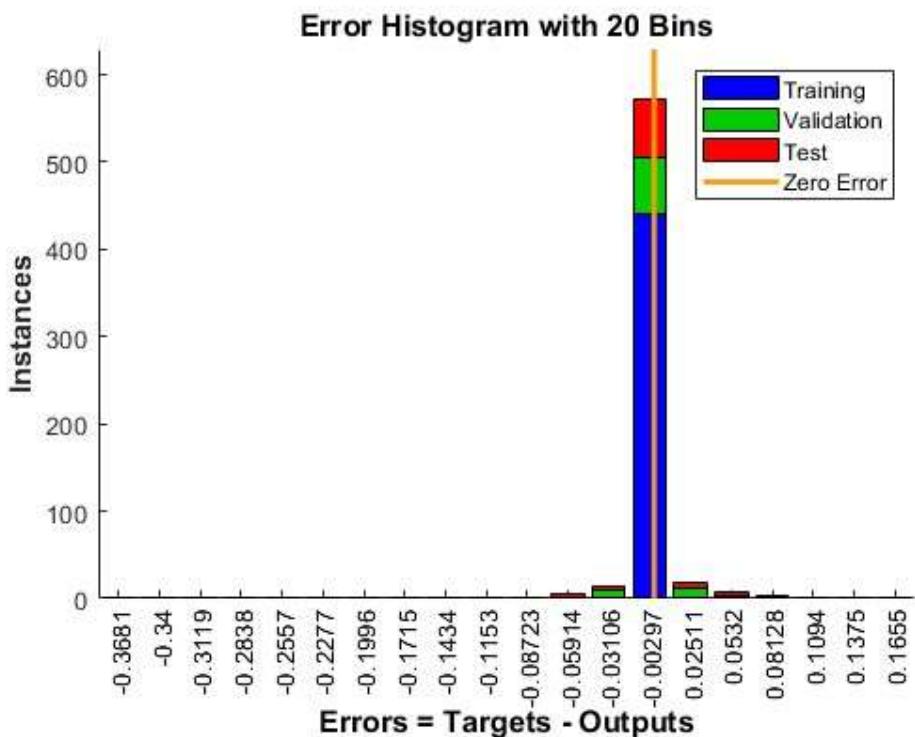


Рисунок 8 – Гистограмма ошибок

Из вышеприведенного можно сделать вывод, что нейросеть обучилась хорошо, но не идеально. Ее использование для синтеза шарнирного четырехзвенника с желаемой шатунной кривой (эллипс с полуосами $a = 0.6$, $b = 0.3$ с центром, расположенным в точке $x = 1.2$, $y = 0.2$), позволило получить следующий результат: стойка: $l_0 = 2.671$, кривошип: $l_1 = 0.655$, шатун: $l_2 = 2.363$, коромысло: $l_3 = 0.973$. Шатунные кривые (желаемая и реализуемая при указанных размерах звеньев) показаны на рисунке 10.

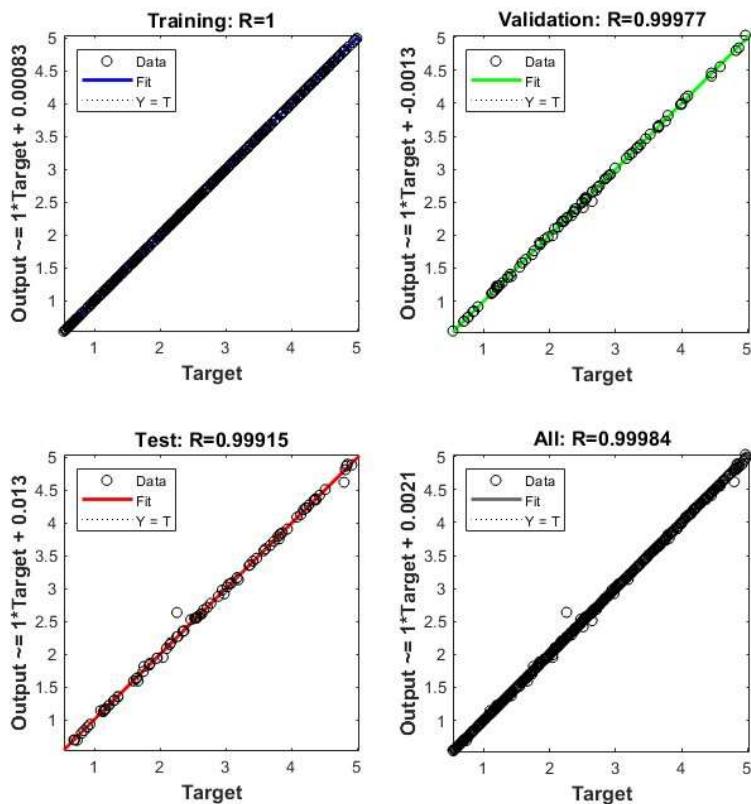


Рисунок 9 – Регрессия

Синтез шатунной кривой четырёхзвенника (все звенья переменные)

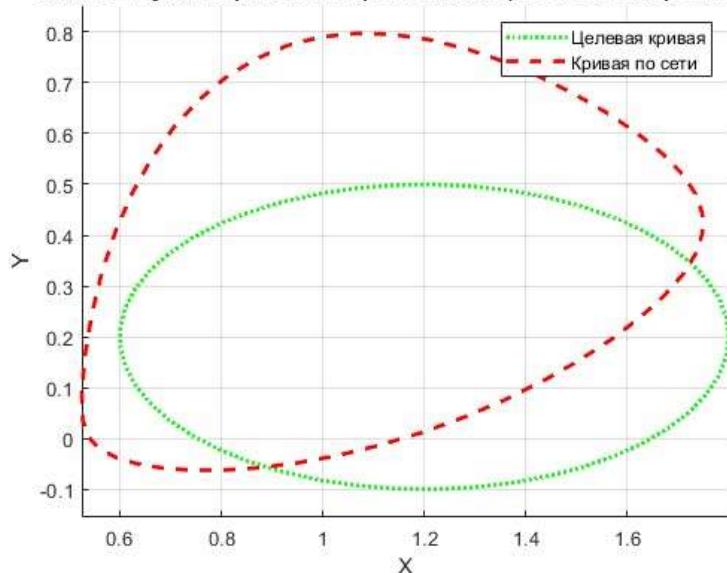


Рисунок 10 – Шатунные кривые шарнирного четырехзвенника: желаемая (целевая) и синтезированная с использованием нейронной сети

Результаты, полученные в данном примере, показывают, что в принципе, нейронные сети могут быть успешно использованы для синтеза шарнирных механизмов, удовлетворяющих различным требованиям. Однако, для получения желаемого результата, необходимо, прежде всего, формировать адекватную выборку сочетаний кинематических параметров механизма для обеспечения целенаправленного обучения нейронной сети. Эта выборка должна быть не только достаточно большой, но и учитывать особенности решаемой задачи. Так, например, чтобы повысить точность решения рассмотренной выше задачи, желательно увеличить

обучающую выборку (ориентировочно до 2000-5000 примеров), более детально описать желаемую шатунную кривую путем увеличения числа ее точек (первоначально до 100-200), варьировать выбираемые размеры звеньев в более широких диапазонах. Кроме этого, желательно использовать аугментацию данных, включая масштабирование кривой (увеличение/уменьшение всех координат), повороты желаемой кривой на угол 10°-20°, небольшие сдвиги по осям x и y , добавление небольшого случайного шума в координаты точек кривой.

Заключение

Вопросы, обсуждаемые в данной статье, объясняются необходимостью более качественной подготовки современных инженеров, способных решать сложные технические задачи различной направленности. Применительно к теории шарнирных механизмов речь идет об актуальном подходе к методологии решения прямых и обратных задач их кинематического анализа и синтеза, основанной на использовании современных программных сред.

Вплоть до настоящего времени в методологии решения таких задач в основном используются графоаналитические методы, о чем свидетельствует анализ содержания многих учебников и учебных пособий по теории механизмов, опубликованных, в том числе, в последние годы. В то же время необходимо отметить, что даже в ставших классическими учебниках, имеются разделы, посвященные аналитическим и численным методам анализа и синтеза механизмов. Но в них вопросы, связанные с реализацией этих методов на практике, обсуждаются весьма поверхностно. В данной работе мы стремились показать преимущества численно-аналитических методов по сравнению с другими, проявляющиеся при решении достаточно сложных практических задач.

Для плоских шарнирных механизмов произвольной структуры кинематические передаточные функции, полностью определяющие их кинематические особенности, могут быть получены из системы уравнений геометрических связей. Анализ якобиана этой системы, представленный в символьной форме, позволяет выявить потенциально возможные сингулярные конфигурации, в которых механизм не существует (т. е., не может быть собран без деформации звеньев) или же мгновенно приобретает или теряет определенную подвижность. В некоторых случаях механизмы, теоретически представляющие собой геометрически неизменяемую систему (ферму), способны изменять свою конфигурацию. Такие механизмы относят к сингулярным (т. е., особым). Как правило, в них излишние связи устранины благодаря наличию звеньев, способных деформироваться или путем соответствующего подбора кинематических параметров звеньев. Следовательно, для кинематического анализа и синтеза сингулярных механизмов кроме системы уравнений геометрических связей необходимо использовать дополнительные уравнения, позволяющие учесть избыточные связи в механизме. Это достаточно сложная задача и в общем случае ее решение возможно только с использованием численных методов с реализацией в современных программных средах.

Например, система нелинейных уравнений геометрических связей механизма, дополненная уравнениями, характеризующими избыточные связи, в большинстве случаев может быть сведена к системе алгебраических (полиномиальных) уравнений (см., например (15)). Уравнения такой системы представляют собой кольцо полиномов над полем вещественных чисел. Множество, которое порождает идеал этого кольца, обладающее специальными свойствами представляет собой базис Грёбнера [11]. Основная цель построения этого базиса состоит в преобразовании исходной системы в новую, эквивалентную систему (т. е. имеющую то же самое множество решений), но с которой гораздо проще работать. В определенной мере базис Грёбнера, заданного кольца полиномов, построенный с учетом принятой лексикографической последовательности неизвестных, подобен системе линейных уравнений, приведенной к треугольной форме с использованием метода Гаусса. В настоящее время разработан ряд эффективных алгоритмов построения базиса Грёбнера, которые достаточно просто реализовать в Maple, Matlab, SciLab, Modelica и в других программных средах. Поэтому проблему численного решения системы уравнений связей шарнирных

механизмов в настоящее время можно считать решенной. Исключение могут составлять некоторые системы уравнений связей большой размерности. Но на практике механизмы, представляемые такими системами, встречаются довольно редко, поэтому их исследование рекомендуется проводить, используя индивидуализированный подход.

Аналитические и численные методы для анализа сингулярностей и решений прямых и обратных задач кинематики, в настоящее время могут быть успешно реализованы на современных вычислительных платформах. Кроме этого, относительная простота получения таких решений открывает новые возможности для решения задач синтеза методами анализа с использованием современных методов глобальной и многокритериальной оптимизации, нейронных сетей, цифровых двойников и промпт-ижиниринга. В данной работе приведен пример синтеза классического шарнирного четырехзвенника по заданной шатунной кривой с использованием нейронной сети. Это один из вариантов решения задачи синтеза методом анализа, т. к. для обучения нейросети требуется обучающая выборка сочетаний размеров звеньев механизма, формируемая в результате многократного решения прямой задачи кинематики.

Таким образом, примеры, приведенные в данной работе, свидетельствуют о том, что численно-аналитический подход к решению задач механики многозвездных шарнирных механизмов является актуальной альтернативой методам, хорошо обоснованным в классической теории механизмов. На его основе может быть создана современная методология анализа и синтеза различных видов механизмов и, в том числе, шарнирных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М.: Кнорус, 2023. - 640 с.
2. Фролов, К. В. Теория механизмов и механика машин : учебник / К. В. Фролов, С. А. Попов, А. К. Мусатов, Г. А. Тимофеев ; под редакцией Г. А. Тимофеева. - 7-е изд. - Москва : МГТУ им. Баумана, 2012. - 686 с.
3. Говорухин, В. Н. Компьютер в математическом исследовании [Maple, MATLAB, LaTeX] / В. Н. Говорухин, В. Г. Цибулин. - СПб. : Питер бук, 2001. - 619 с.
4. Митяков, Е. С. Искусственный интеллект и машинное обучение : учебное пособие для вузов / Е. С. Митяков, А. Г. Шмелева, А. И. Ладынин. - Санкт-Петербург : Лань, 2025. - 252 с.
5. Левитский, Н. И. Теория механизмов и машин : учеб. пособие для университетов / Н. И. Левитский. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Наука, 1990. - 590 с.
6. Пожбелко, В. И. Единая теория структуры, синтеза и анализа многозвездных механических систем с геометрическими, гибкими и динамическими связями звеньев. Часть 1. Базовые структурные уравнения и универсальные таблицы строения / В. И. Пожбелко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 2020. - № 9(726). - С. 24-43.
7. Поляков, А. М. Альтернативное доказательство теоремы Грасгофа на основе анализа кинематических передаточных функций механизма / А.М. Поляков // Вестник СевНТУ. Серия: Механика, энергетика, экология. - 2011. - №119. - С. 5-17.
8. Величенко, В. В. Матрично-геометрические методы в механике с приложениями к задачам робототехники / В. В. Величенко. - Москва : Наука, 1988. - 279 с.
9. Поляков, А. М. Численно-аналитический метод решения задач кинематики шарнирных механизмов с несколькими степенями подвижности / А. М. Поляков, М. А. Колесова, Е. А. Чепенюк // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. - 2012. - №1. - С. 90-96.
10. Соболь, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболь, Р. Б. Статников. - М.: Наука, 1981. - 110 с.
11. Аржанцев, И. В. Базисы Грёбнера и системы алгебраических уравнений / И. В. Аржанцев. - М.: МЦНМО, 2003. - 68 с.

Поляков Александр Михайлович
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»;
г. Севастополь;
канд. техн. наук, доцент, в.н.с.
научной лаборатория
«Биомеханика»;
e-mail: a.m.poljakov@mail.sevsu.ru

Бугаев Павел Александрович
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»
г. Севастополь;
канд. техн. наук, доцент кафедры
«Судовождение и безопасность
судоходства»;
e-mail: pabugayov@sevsu.ru

Колесов Максим Андреевич
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»,
г. Севастополь;
студент направления подготовки
15.03.05 Конструкторско-
технологическое обеспечение
машиностроительных производств;
e-mail: makolesov@mail.sevsu.ru

CURRENT METHODOLOGICAL BASES NUMERICAL-ANALYTICAL MECHANICS OF MULTI-LINK HINGED MECHANISMS

Abstract. Despite the fact that the theory of articulated multi-link mechanisms has been studied in sufficient detail and described in many literary sources, solving practical problems in this area is very labor-intensive due to their nonlinearity and scale. Therefore, up to the present time, when solving problems of analysis and synthesis of multi-link mechanisms, graph-analytical methods are most often used that do not apply to mechanisms with redundant links, and the problems of planning the movements of mechanisms with several degrees of freedom have been studied only fragmentarily. At the same time, the current state of hardware and software allows us to qualitatively change the approach to solving such problems on a new methodological basis - using numerical and analytical methods. This paper presents specific examples of the numerical and analytical approach to solving problems in the mechanics of articulated multi-link mechanisms of sequential and parallel structure without redundant links. The results obtained can be used to generalize the theory and methods for solving applied problems of articulated mechanisms focused on the use of modern software and artificial intelligence.

Keywords: mechanics of mechanisms, hinge mechanism, kinematic model of the mechanism, numerical and analytical methods, artificial intelligence.

BIBLIOGRAPHY

1. Artobolevsky, I. I. Theory of mechanisms and machines / I. I. Artobolevsky. - M.: Knorus, 2023. - 640 p.
2. Frolov, K. V. Theory of mechanisms and mechanics of machines: textbook / K. V. Frolov, S. A. Popov, A. K. Musatov, G. A. Timofeev; edited by G. A. Timofeev. - 7th ed. - Moscow: MSTU im. Bauman, 2012. - 686 p.
3. Govorukhin, V. N. Computer in mathematical research [Maple, MATLAB, LaTeX] / V. N. Govorukhin, V. G. Tsibulin. - St. Petersburg. : Peter book, 2001. - 619 p.
4. Mityakov, E. S. Artificial Intelligence and Machine Learning: a textbook for universities / E. S. Mityakov, A. G. Shmeleva, A. I. Ladynin. - St. Petersburg: Lan, 2025. - 252 p.
5. Levitsky, N. I. Theory of Mechanisms and Machines: a textbook for universities / N. I. Levitsky. - 2nd ed., revised. and enlarged. - Moscow: Nauka, 1990. - 590 p.
6. Pozhbelko, V. I. Unified Theory of Structure, Synthesis, and Analysis of Multilink Mechanical Systems with Geometric, Flexible, and Dynamic Link Connections. Part 1. Basic Structural Equations and Universal Structure Tables / V. I. Pozhbelko // News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. - 2020. - No. 9(726). - P. 24-43.
7. Poliakov, A. M. Alternative proof of Grashof's theorem based on the analysis of kinematic transfer functions of the mechanism / A. M. Poliakov // Bulletin of SevNTU. Series: Mechanics, energy, ecology. - 2011. - No. 119. - P. 5-17.
8. Velichenko, V. V. Matrix-geometric methods in mechanics with applications to robotics problems / V. V. Velichenko. - Moscow: Nauka, 1988. - 279 p.
9. Poliakov, A. M. Numerical-analytical method for solving kinematics problems of articulated mechanisms with several degrees of freedom / A. M. Poliakov, M. A. Kolesova, E. A. Chepenyuk // New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering. - 2012. - No. 1. - P. 90-96.
10. Sobol, I. M. Selection of optimal parameters in problems with many criteria / I. M. Sobol, R. B. Statnikov. - M.: Science, 1981. - 110 p.
11. Arzhantsev, I. V. Gröbner bases and systems of algebraic equations / I. V. Arzhantsev. - M.: MCNMO, 2003. - 68 p.

Poliakov Aleksandr Mikhaylovich
"Sevastopol State University";
Sevastopol;
Ph.D. (Eng), Associate Professor,
Leading Researcher of the Scientific
Laboratory "Biomechanics",
e-mail: a.m.poliakov@mail.sevsu.ru

Bugayov Pavel Aleksandrovich
"Sevastopol State University";
Sevastopol;
Ph.D. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the
Department of "Navigation and
Safety of Shipping";
e-mail: pabugayov@mail.sevsu.ru

Kolesov Maxim Andreevich
"Sevastopol State University";
Sevastopol;
student of the training program
15.03.05 Design and technological
support for mechanical engineering
production
e-mail: makolesov@mail.sevsu.ru

КОВАЛЁВ Н.И., ЛУКИНА Л.И., СОЛДАТОВА С.В., МОИСЕЕВ Д.В.

ПРОБЛЕМА АВАРИЙНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА МЕТАНООПАСНОЙ ШАХТЕ «АНЖЕРСКАЯ ЮЖНАЯ»

Аннотация. Анализ причин объемных взрывов метана на угольных шахтах и полученные практические данные на шахте Анжерская Южная показали высокую эффективность геокосмического метода исследования и аппаратуры «Поиск» для оперативного дистанционного поиска локальных газовых аномалий в угленосных зонах шахт и выбора точек под бурение опережающих скважин. Обнаружены пути миграции газа от природных месторождений к угольным пластам по тектоническим разломам, расположенным в границах угольных шахт. Показано влияние этих газовых потоков, основным компонентом которых является метан, на газовую опасность шахт. В качестве основных мероприятий по предотвращению мгновенных взрывов метана на шахтах предложены опережающее бурение вертикальных дегазирующих скважин до глубин залегания газовых аномалий и шпурование как угольного пласта, так и пород под угольным пластом.

Ключевые слова: угольные шахты, аварии, объемные взрывы метана, тектонические разломы, миграция газа, дегазирующие скважины, шпурование угольного пласта и пород.

Введение

Проблема безопасности на угольных шахтах является актуальной. Одной из причин участившихся аварий на угольных шахтах является истощение угольных запасов. Всё чаще добыча энергетических углей осуществляется на больших глубинах, из-за чего участились аварии на угольных шахтах, сопровождающиеся гибелью большого числа горняков и разрушением шахтного оборудования. Проведен анализ причин аварий Донбасса и Кузбасса. Несмотря на принятие серьезных мер, направленных на комплексную дегазацию шахт, внедрение совершенных систем автоматического контроля за концентрацией газа в штреках, аварии не прекращаются. Их причинами являются в 10-15% случаев нарушения техники безопасности, но основная причина 85-90% всех аварий – мгновенные объемные взрывы газа, вследствие поступления под давлением больших объемов метана при непосредственной разработке угольных пластов, что ведет к самовоспламенению газовой смеси и объемным взрывам метано-воздушной смеси в штреке [1].

При исследовании горных отводов на шахтах им. Засядько, Октябрьская, Сибирская, Заречная [2, 3, 4] специалистами Севастопольского госуниверситета было доказано, что поступление больших объемов газа в рабочий штрек может происходить из угольного пласта, расположенного вблизи локальных газовых аномалий с высоким давлением метана. Постоянное поступление метана под высоким давлением к локальным аномалиям происходит по тектоническим разломам, имеющим связь с природными глубокозалегающими месторождениями газа и пересекающими угленосную зону шахты [6].

На примере аварий на шахте им Засядько (2001 г., 2002 г., 2006 г., 2007 г.) с гибелью большого количества горняков можно констатировать, что места для бурения опережающих дегазационных скважин на шахте были выбраны произвольно и не обеспечивали дегазацию газа с высоким давлением, т.к. не попадали в тектонические малоамплитудные разломы, т.к. работы по выявлению малоамплитудных газопроницаемых тектонических разломов перед эксплуатацией шахты не проводились. Так, в публикациях [2, 5] было показано, что при аварии на шахте им. Засядько в 2007 г. объемный взрыв газовой смеси произошел вследствие извлечения угольного пласта на глубине около 1000 м, расположенного над одним из тектонических разломов, по которому происходила подземная миграция метана под высоким давлением (160 кгс/см²) от крупного месторождения природного газа к шахтному полю. Извлечение угольного пласта, находящегося непосредственно над тектоническим разломом, вероятно, вызывает мгновенное разуплотнение прилегающих пород, что приводит к разрушению залегающих под угольным пластом газонасыщенных пород из-за воздействия на них высокого давления свободного газа. При резком вскрытии пористых пород, таких как песчаники, алевролиты, залегающих над угольными пластами, происходит мгновенный выброс в штрек больших объемов метана, его самовоспламенению и объемному взрыву метано-воздушной смеси с формированием разрушительной ударной волны [7-9]. Математическое моделирование этого процесса, выполненное Специалистами СевГУ по заказу Минтопэнерго Украины в 2010 году [7-9], подтвердило факт самовоспламенения

газовой смеси при мгновенном поступлении большого объема метана под давлением в газовоздушную кислородосодержащую среду штрека, где постоянно находятся окисленные углеводороды, способствующие воспламенению газовой смеси.

С помощью дистанционного метода космогеологической разведки и резонансно-тестовой полевой аппаратуры дистанционного геофизического комплекса «Поиск» было установлено, что шахтное поле угольной шахты им. Засядько пересекают четыре тектонических глубинных разлома с повышенным давлением в них газа – три «канала» шириной 40-60 м по направлению с запада на восток и один – с севера на юг [2]. Газ из основного источника, находящегося за пределами шахтного поля, с давлением 350 кгс/см² поступал к шахтному полю по трем тектоническим разломам (1, 2, 8), пересекающим шахтное поле с запада на восток (рисунок 1).

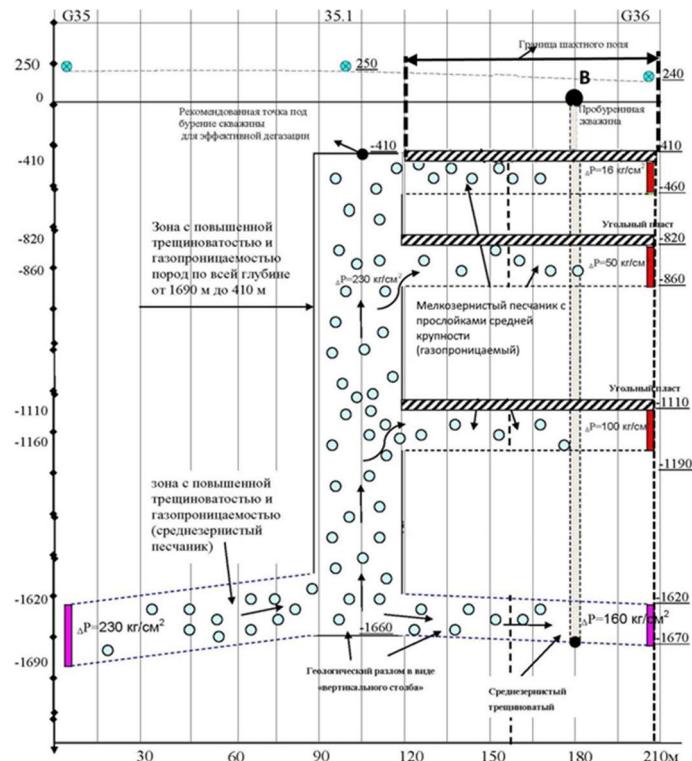


Рисунок 1 - Глубинный разрез Q35-Q36 северного газоносного канала, пересекающего угленосную зону шахтного поля угольной шахты им. Засядько

Через субвертикальные зоны сплошной деструкции пород, так называемые вертикальные «столбы», находящиеся за пределами шахтного поля и располагающиеся на каждом из трех тектонических разломов, газ с высоким давлением по тектоническим разломам поступал под угольные пласти, залегающие на глубинах более 400 м. Миграция газа по «каналам» с запада на восток создавала высокое давления газа в локальных газовых аномалиях, расположенных в угленосной зоне вблизи разломов. Все четыре «канала» на глубинах от 410 до 1690 м имели по четыре газонасыщенных горизонта мощностью по 20-80 м, образованных трещиноватыми среднезернистыми песчаниками. Избыточное давление газа в горизонтах (в зависимости от глубин) составляло от 16 кгс/см² (верхний горизонт) до 160 кгс/см² (нижний горизонт, в котором произошел объемный взрыв метана). Все газовые горизонты располагались непосредственно под угольными пластами.

Распределение газа под угольные пласти в угленосной зоне шахты происходило от нижнего горизонта к верхнему по общему газопроницаемому вертикальному «столбу» с глубины 1690 м до 410 м.

Измеренные геофизической аппаратурой комплекса «Поиск» параметры газовых «каналов», глубин их залегания, наличие миграции природного углеводородного газа с давлением $\Delta P \geq 160$ кгс/см², значительно превышающим давление газа в угольных пластах, было подтверждено пробуренной скважиной в северном газовом «канале №3» во всех четырех горизонтах. Поэтому бурение дегазирующих скважин необходимо выполнять

непосредственно в вертикальных газопроницаемых «каналах», что позволит резко снизить давление газа под угольными пластами по всей угленосной зоне шахты. Получаемый из такой скважины природный газ с промышленным притоком и высоким давлением выгодно использовать на газогенераторах для технического обеспечения шахты и для электроснабжения близлежащих населенных пунктов. Аналогичная картина в выявлена на южном участке шахты Анжерская Южная [10].

Проблема газовой безопасности на метаноопасных шахтах касается и угольной шахты «Анжерская-Южная», которая по газоносности относится к самой высокой категорийности шахт в Кузбасском бассейне (Анжерский район).

Основная часть

Геокосмическими методами поиска на обследуемом южном участке горного отвода шахты Анжерская Южная площадью участок $S=7,1 \text{ км}^2$ выявлена природная газовая залежь ГА. На космическом фотоснимке схема миграции газа в угленосную зону шахты от природного источника (ГА), а также выделены границы зоны повышенной газовой опасности (рисунок 2).

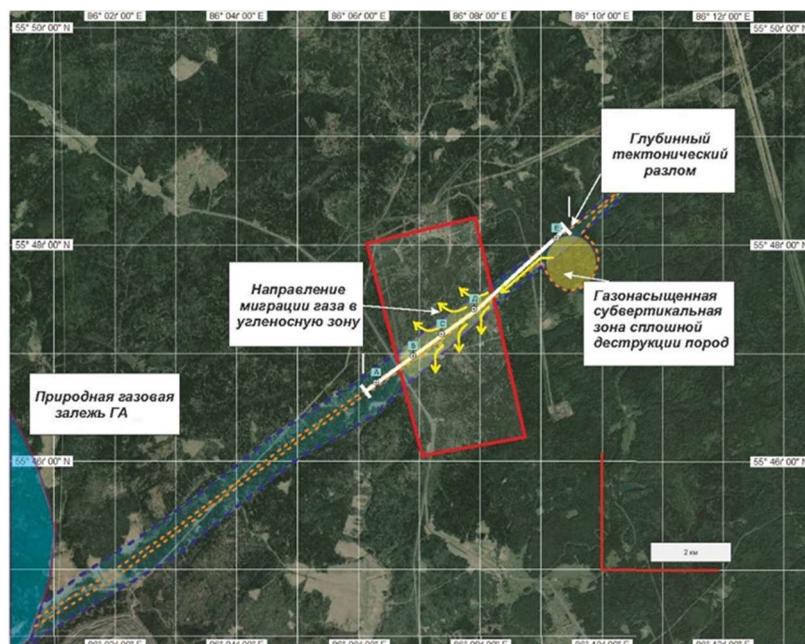


Рисунок 2 - Космический фотоснимок - Схема миграции газа от природного источника газа высокого давления к пористым пластам пород угленосной зоны

Методом дистанционной космогеологической разведки с применением геофизического комплекса «Поиск» на обследуемом участке выявлены две локальные газовые аномалии ГА-1 и ГА-2 с высоким давлением метана в них (рисунок 3). От глубокозалегающей «залежи» (ГА) природный газ поступает по глубинному тектоническому разлому, пересекающему площадь участка, в вертикальный газопроницаемый участок пород, который представляет собой пористые структуры пород. По этой субвертикальной зоне сплошной деструкции пород газ поднимается вверх и по двум «каналам» поступает под угольные пласты угольной зоны на глубинах от 480 м до 600 м.

Таким образом, при разработке угольных пластов на глубинах от 180 до 610 м возникает опасность взрыва газовоздушной смеси, поэтому требуется создание дополнительных организационно-технических мероприятий, направленных на исключение мгновенных поступлений газа в рабочий штрек в момент удаления угольного пласта, происходящего в результате разуплотнения пород в подошве данного пласта.

С целью разработки предложений дополнительных организационно-технических мероприятий по предотвращению мгновенного поступления больших объемов метана из данных аномалий в забой при разработке угольного пласта, проведена следующая работа. Дистанционным геокосмическим методом определены параметры залегания локальных газовых аномалий ГА-1 и ГА-2, сформированных в выявленном малоамплитудном тектоническом разломе, который пересекает шахтное поле участка. Глубины залегания

газовых коллекторов в ГА-1 и ГА-2 составили 483-496 м и 800-810 м, давление газа - 55÷60 кгс/см² и 65÷70 кгс/см² соответственно.

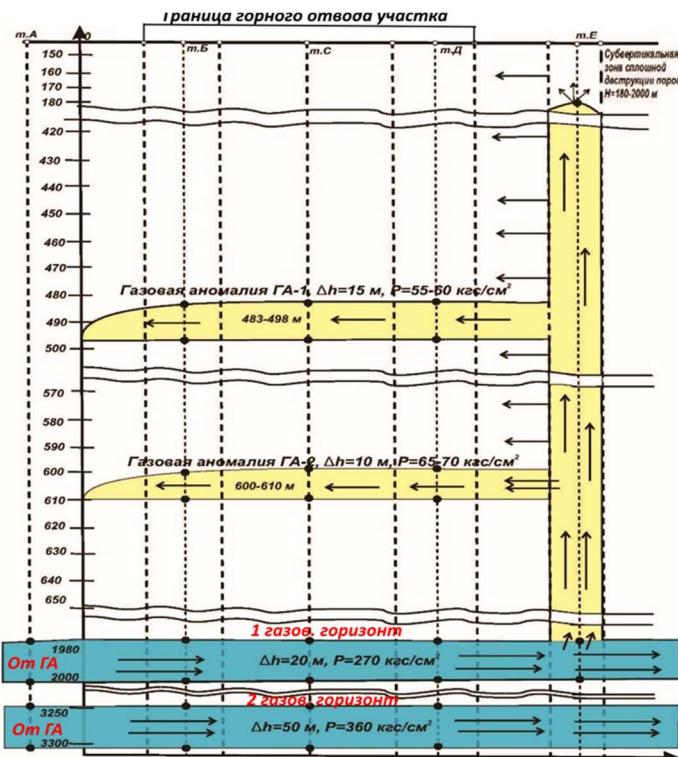


Рисунок 3 - Схема вертикального разреза южного участка шахтного поля шахты Анжерская-Южная с точками измерения линии тектонического разлома и схемой газодинамической миграции газа в угленосную зону

Определены границы тектонического разлома на участке с миграцией в нём газовых потоков на глубинах >1000 м (газ с повышенным давлением), оценены глубина залегания газовых потоков в разломе и направление давления газа в них; определена и оконтурена субвертикальная зона сплошной деструкции пород, по которой газ с повышенным давлением поступает от глубокозалегающего природного источника метана с высоким давлением газа (ГА) к газопроницаемым породам (песчаники, пористые аргиллиты),

На горизонтальной площине шахтного поля определены границы локальных метановых аномалий, оценены мощности наиболее крупных (по толщине) газовых коллекторов в отдельных (трех-четырех) точках, выбранных на линии геологического разлома, проходящего через площину выявленных локальных аномалий ГА-1 и ГА-2. Разработана и представлена газодинамическая модель на вертикальном глубинном разрезе шахтного участка со структурной схемой поступления метана от источника высокого давления к выявленным локальным газовым аномалиям, а затем к газонасыщенным породам, залегающим в угленосной зоне и непосредственно под угольными пластами.

Исходя из полученных результатов исследований, их анализа и обобщений, были разработаны дополнительные предложения по обеспечению газовой безопасности при вскрытии угольных пластов на участке, находящемся вблизи локальных газовых аномалий с повышенным давлением газа, даны рекомендации выбора мест для бурения дегазационных скважин в газоносных «коллекторах», а также по дегазации шпурованием пластов пород, залегающих в подошве разработанного угольного пласта.

Заключение

Анализ причин объемных взрывов метана на угольных шахтах и полученные практические данные на шахте Анжерская Южная показали высокую эффективность аппаратуры «Поиск» для оперативного дистанционного поиска локальных газовых аномалий в угленосных зонах шахт и выбора точек под бурение опережающих скважин.

Главным направлением борьбы с газовой взрывоопасностью на угольных шахтах является снижение высокого давления газа в границах выявленных локальных газовых

аномалий. Для этих целей необходимо первоначальное установление конкретных границ локальных зон повышенной газовой опасности с учетом ширины и интервала глубины их залегания, а также нахождения разрабатываемого угольного пласта в угленосной зоне. Дополнительно к существующим нормативным требованиям целесообразно производить опережающее бурение вертикальных дегазирующих скважин до глубин залегания локальных газовых аномалий, а также шпуровать газопроницаемые породы под угольными пластами.

При отсутствии возможности выполнить организационно-технические мероприятия по бурению дегазирующих скважин (технические, экономические и др. причины) целесообразно запретить разработку угольных пластов в границах установленных зон повышенной газовой опасности, во избежание разрушительных аварий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руднев Е.Н. К вопросу борьбы с метаном на угольных шахтах Украины // Уголь Украины. - 2009, №1, с.40-46
2. Ковалев Н.И., Гох В.А., Котелянец И.И. и др. Выбор точек под бурение газоносных скважин с помощью дистанционной аппаратуры комплекса "Поиск" на шахтном поле угольной шахты Засядько: Отчет по НИР / СНУЯЭиП, Севастополь. ГГН /Донецк, 2009, 48 с.
3. Ковалев Н.И., Солдатова С.В., Лукина Л.И. и др. Дистанционное определение газовых аномалий в шахтных полях ОАО «СУЭК-Кузбасс» (Новокузнецк): Отчет по НИР / СНУЯЭиП, Севастополь, 2010, 42 с.
4. Ковалев Н.И., Солдатова С.В., Лукина Л.И. и др. Определение газовых аномалий в шахтных полях угольных шахт «Заречная», «Октябрьская», «Сибирская» с применением дистанционных методов и средств геологоразведки (космогеологоразведки и аппаратуры ЯМР): Отчет по НИР / СНУЯЭиП, Севастополь, 2011, 72 с.
5. Ковалев Н.И., Лукина Л.И., Солдатова С.В., Фролова Л.А. Исследование нового источника угрозы объемных взрывов метана на угольных шахтах // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2018. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой. 2018. С. 561-566.
6. Ковалев Н.И., Гох В.А., Солдатова С.В. и др. Использование дистанционного геогеологического комплекса "Поиск" для обнаружения и оконтуривания углеводородных месторождений // Геоинформатика, 2009, № 3, с. 83-87
7. Ковалев Н.И., Пухлий В.А., Солдатова С.В. О механизме образования объемных взрывов и детонации углеводородных газов в угольных шахтах // Сборник статей международной научно-практической конференции 31 января 2014 г., г. Уфа, с.153-162.
8. Пухлий В.А., Ковалев Н.И., Софийский И.Ю. Математическое моделирование процессов воспламенения и самовоспламенения углеводородов в химической кинетике. – В сб.: Научные труды СНУЯЭиП, вып.4(40), 2011, с.153-162.
9. Пухлий В.А., Ковалев Н.И. Механизмы и пути процессов горения углеводородов в химической кинетике. – В сб.: Научные труды СНУЯЭиП, вып.1(41), 2012, с.144-153.
10. Ковалев. Н.И., Солдатова С.В. Лукина Л.И. и др. Определение газовых аномалий с высоким давлением метана, залегающих на территории шахтного поля ш. «Анжерская-Южная», с применением дистанционных геологических методов поиска залежей природного газа: Отчет по НИР, /ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» / Севастополь, 2022

Ковалёв Николай Ильич

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, зав. НИЛ «Ядерно-химические технологии и радиационно-технологический контроль»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +79787453397,
NIKovalev@ sevsu.ru

Лукина Лидия Ивановна

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Радиоэкология и экологическая безопасность» 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +79787092946,
LILukina@sevsu.ru

Солдатова Светлана Владимировна

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Научный сотрудник НИЛ «Ядерно-химические технологии и радиационно-технологический контроль»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +79780406030,
SVSoldanova@sevsu.ru

Моисеев Дмитрий Владимирович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Доктор технических наук, доцент, директор инновационно-образовательного центра «Центр ИИ СевГУ», декан Факультета Информационных технологий, заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы» 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +79787092996,
DVMoiseev@sevsu.ru

EMERGENCY SAFETY PROBLEMS AT THE METHANE-HAZARDOUS ANZHERSKAYA YUZHNAЯ MINE

Abstract. An analysis of the causes of methane explosions in coal mines and the practical data obtained at the Anzhereskaya Yuzhnaya mine demonstrated the high effectiveness of the geospace research method and the "Poisk" equipment for the rapid remote search for local gas anomalies in coal-bearing zones of mines and the selection of sites for drilling pilot wells. The impact of these gas flows, the main component of which is methane, on the gas hazard of mines is demonstrated. Pre-drilling is proposed as the primary measure to prevent methane explosions in mines vertical degassing boreholes to the depths of gas anomalies and drilling into both the coal seam and the rock beneath it.

Keywords: coal mines, accidents, methane explosions, tectonic faults, gas migration, degassing boreholes, drilling into the coal seam and rock.

BIBLIOGRAPHY

1. Rudnev E.N. On the issue of combating methane in the coal mines of Ukraine // Ugol Ukrayn. - 2009, No. 1, p.40-46
2. Kovalev N.I., Gokh V.A., Kotelyanets I.I. and others. Selection of points for drilling gas-bearing wells using remote equipment of the Poisk complex in the mine field of the Zasyadko coal mine: Report on research, / SNUYaEiP., GGN / Donetsk, 2009, 48 p.
3. Kovalev N.I., Soldatova S.V., Lukina L.I. and others. Remote detection of gas anomalies in the mine fields of OAO SUEK-Kuzbass (Novokuznetsk): Research report /SNUYEiP, Sevastopol, 2010,42 p.
4. Kovalev N.I., Soldatova S.V., Lukina L.I. and others. Determination of gas anomalies in the mine fields of the Zarechnaya, Oktyabrskaya, Sibirska coal mines using remote methods and geological exploration tools (cosmogeological exploration and NMR equipment): Report on research / SNUYEiP, Sevastopol, 2011, 72 p.
5. Kovalev N.I., Lukina L.I., Soldatova S.V., Frolova L.A. Study of a new source of the threat of volumetric methane explosions in coal mines // Ecological, industrial and energy safety - 2018. Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference. ed. L. I. Lukina, N. A. Bezhina, N. V. Lyamina. 2018. P. 561-566.
6. Kovalev N.I., Gokh V.A., Soldatova S.V. et al. Use of remote geohographic complex "Poisk" for detection and delineation of hydrocarbon deposits // Geoinformatics, 2009, no. 3, p. 83-87
7. Pukhliy V.A., Pukhliy Zh.A., Kovalev N.I. Resonances in physics, v.II. Theory and application in technology. Monograph. Cherkasy TsNTEI, Sevastopol, 2012, 479 p.
8. Pukhliy V.A., Kovalev N.I., Soldatova S.V. Application of remote geophysical complex "Poisk": Solution of engineering and geological prospecting problems. Monograph. Palma rucm Academic Publishing, L.cctkmljha, 2016, 170 p.
9. Pukhliy V.A., Kovalev N.I., Sofiysky I.Yu. Mathematical modeling of the processes of ignition and self-ignition of hydrocarbons in chemical kinetics. - In: Scientific works of SNNUAEiP, issue 4 (40), 2011, p. 153-162.
10. Kovalev. N.I., Soldatova S.V., Lukina L.I. and others. Determination of gas anomalies with high methane pressure occurring on the territory of the mine field sh. "Anzhereskaya-Yuzhnaya", using remote geological methods to search for natural gas deposits: Report on research, / Sevastopol State University / Sevastopol, 2022, 82 p.

Kovalev Nikolay Ilyich

FGAOU VO "Sevastopol State University", Sevastopol
Candidate of Technical Sciences, Head of the Research
Laboratory Nuclear Chemical Technologies
299053, Sevastopol, st. University, 33
Tel. +79787453397,
NIKovalev@sevsu.ru

Lukina Lidiya Ivanovna

FGAOU VO "Sevastopol State University", Sevastopol
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Radioecology
and environmental technology
299053, Sevastopol, st. University, 33
Tel. +79787092946
LILukina@sevsu.ru

Soldatova Svetlana Vladivirovna

FGAOU VO "Sevastopol State University", Sevastopol
Researcher of the Research Laboratory Nuclear
Chemical Technologies
299053, Sevastopol, st. University, 33
Tel. +79780406030,
SVSoldanova@sevsu.ru

Moiseev Dmitry Vladimirovich

FGAOU VO "Sevastopol State University", Sevastopol
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Director of the Innovation and Educational Center
"Center of AI SevSU", Dean of the Faculty of
Information Technology, Head of the Department of
Information Technologies and Systems
299053, Sevastopol, Universitetskaya Street, 33
Tel. +79787092996,
DVMoiseev@sevsu.ru

СКАТКОВ А.В., ДОРОНИНА Ю.В., МОИСЕЕВ Д.В., ЦОФНАС Д.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНОК СОСТОЯНИЯ КАНАЛА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА НА ОСНОВЕ ЭНТРОПИЙНОЙ МОДЕЛИ

Аннотация. Рассматривается метод тестирования состояния каналов информационного обмена на основе энтропийной модели. Показано, что параметрическая настройка и выбор закона распределения случайной величины, характеризующей функционирование отдельного элемента канала информационного обмена, значительно влияет на его энтропию, а при увеличении времени, значение энтропии возрастает и имеет сложный рельеф моделирующей поверхности. Предложена функционально-структурная схема моделирующего стенда оценивания состояний каналов информационного обмена. Решение конкретных задач, сформулированных в данном исследовании возможно на основе предложенного стенда в рамках обеспечения устойчивого функционирования информационных каналов в условиях атак.

Ключевые слова: канал информационного обмена, тестирование состояния канала, энтропийная модель, моделирующий стенд, система поддержки принятия решений.

Введение

Оценивание качества функционирования каналов информационного обмена (КИО), безусловно, важно, особенно, в свете того, что транспортные каналы осуществляют ряд различных функций:

- предоставляют информационные транспортные сервисы от физического уровня к канальному (широковещательные канал).
- несут контролирующую и сигнальную информацию и данные в исходящей и восходящей информации.
- определяют скремблирование, канальное кодирование, перемежение и подбор скоростей для применения к информации в каждом направлении и другие.

Исходя из разнообразия этих функций, значимость КИО возрастает кратно. В том числе, задачи проектирования КИО должны обеспечить создания защищенных, надежных систем различных классов от мониторинга до управления сложными процессами [1-3].

Энтропия, как мера оценивания неопределенности, широко используется при исследовании технических систем стохастического функционирования. Математический смысл информационной энтропии состоит в логарифме числа доступных состояний системы, что может быть применено при тестировании КИО [4-6].

В предыдущих работах авторов рассматривались модели статистической устойчивости, в том числе интерфейсов беспилотных транспортных средств, которые также включают КИО, как элемент обеспечения коммуникативных взаимодействий между объектами системы [7-9]. Однако, оценивание энтропии при обмене данными не производилось, что и является задачей данной статьи. В целом, решение вопросов оценивания динамики функционирования систем с целью выявления неправомерного доступа, либо нарушения заданного режима проводилось различными авторами, но, моделирование системной энтропии как основы тестирования КИО, в полной мере ранее не реализовывалось [10-13].

Цель исследования – предложить подход к определению энтропии процесса оценивания состояний КИО.

Основная часть

1. Общие положения энтропийной модели КИО. Рассмотрим некоторые укрупненные аспекты процесса обмена данными в КИО, положенные в основу построения и исследования его модели. На выходе модели декодер получает определенный пакет данных по каналу передачи от кодера. Непосредственно процесс кодирования-декодирования в данном исследовании не рассматривается, а модель строится в предположении о тестировании с целью выявления уязвимостей, влияющих на этот процесс. Для уточнения модели следует учитывать факторы работы КИО (внешние и внутренние), которые влияют на уровень неопределенности процесса тестирования.

На рисунке 1. приведена укрупненная схема функционирования КИО в условиях атак, которые должны быть выявлены в процессе тестирования.

Примем tw – время реализации реакции на w -ое требование; Tc – время цикла мониторинговой системы. Схема функционирования мониторинговой системы циклического типа изображена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Укрупненная схема функционирования КИО в условиях атак

Рассмотрим сложное событие S_k , $k = \overline{1, K}$ в некоторый фиксированный момент времени, которое может быть представлено в логическом виде, отражающее тестирование элементов КИО в разных режимах и которое образует полную группу событий:

$$S_k = S_0 \vee S_1 \vee S_2 \vee S_3, \quad (1)$$

где S_0 – отсутствие тестирования;

S_1 – «легкое», поверхностное тестирование;

S_2 – среднее тестирование;

S_3 – полное тестирование.

При тестировании определяются нарушения в работе одного из трех элементов КИО.

Сумма вероятностей событий, осуществляющихся в результате тестирования

$$P(t) = \sum_{m=1}^M P(H_m) \quad \text{где гипотеза } H_m, m = \overline{1, M}$$

состояния КИО, определяется вероятностью:

задает совокупность событий тестирования КИО.

Рассмотрим гипотезы, связанные с тестированием КИО:

1. H_1 – нарушена работа устройства 1 вероятность этой гипотезы равна: $P(H_1)$;
2. H_2 – нарушена работа устройства 2, вероятность этой гипотезы равна: $P(H_2)$;
3. H_3 – нарушена работа устройства 3, вероятность этой гипотезы равна: $P(H_3)$;
4. Обозначим события, определенные гипотезами H_1, H_2, H_3

$$S_0 | H_1, S_0 | H_2, S_0 | H_3, \quad P(S_0 | H_1), P(S_0 | H_2), P(S_0 | H_3),$$

$$S_1 | H_1, S_1 | H_2, S_1 | H_3, \quad P(S_1 | H_1), P(S_1 | H_2), P(S_1 | H_3),$$

$$S_2 | H_1, S_2 | H_2, S_2 | H_3, \quad P(S_2 | H_1), P(S_2 | H_2), P(S_2 | H_3),$$

$$S_3 | H_1, S_3 | H_2, S_3 | H_3 \quad \text{и их вероятности:} \quad P(S_3 | H_1), P(S_3 | H_2), P(S_3 | H_3).$$

Полагаем известными условные вероятности при оценивании состояний КИО при тестировании в различных режимах.

Используя формулу полной вероятности в предположении о независимости событий S_0, S_1, \dots , получим:

$$\begin{aligned}
 P(S_k) &= \sum_i^N P(H_i) \cdot P(S_k | H_i) = \\
 &= P(H_1) \cdot P(S_0 | H_1) + P(H_2) \cdot P(S_0 | H_2) + P(H_3) \cdot P(S_0 | H_3) + \\
 &+ P(H_1) \cdot P(S_1 | H_1) + P(H_2) \cdot P(S_1 | H_2) + P(H_3) \cdot P(S_1 | H_3) + \\
 &+ P(H_1) \cdot P(S_2 | H_1) + P(H_2) \cdot P(S_2 | H_2) + P(H_3) \cdot P(S_2 | H_3) + \\
 &+ P(H_1) \cdot P(S_3 | H_1) + P(H_2) \cdot P(S_3 | H_2) + P(H_3) \cdot P(S_3 | H_3), \\
 i &= \overline{1, N}, k = \overline{1, K}.
 \end{aligned} \quad (2)$$

Определение энтропии состояния КИО строится в предположении, что в текущий момент времени $t_i, t_0 < t_i < t_{\max}, i = \overline{1, I}$ тестируется только один его элемент, принимая во внимание (2), оценка энтропии КИО определяется на основе выражения:

$$\begin{aligned}
 H_{S_k} = & -P(S_k) \cdot \ln P(S_k) = -[P(H_1) \cdot P(S_1 | H_1) + \\
 & + P(H_2) \cdot P(S_2 | H_2) + P(H_3) \cdot P(S_3 | H_3) P(H_1) \cdot P(S_0 | H_1) + \\
 & + P(H_2) \cdot P(S_0 | H_2) + P(H_3) \cdot P(S_0 | H_3) + \\
 & + P(H_1) \cdot P(S_1 | H_1) + P(H_2) \cdot P(S_1 | H_2) + P(H_3) \cdot P(S_1 | H_3) + \\
 & + P(H_1) \cdot P(S_2 | H_1) + P(H_2) \cdot P(S_2 | H_2) + P(H_3) \cdot P(S_2 | H_3) + \\
 & + P(H_1) \cdot P(S_3 | H_1) + P(H_2) \cdot P(S_3 | H_2) + \\
 & + P(H_3) \cdot P(S_3 | H_3)] \cdot \ln [P(H_1) \cdot P(S_0 | H_1) + P(H_2) \cdot P(S_0 | H_2) + \\
 & + P(H_3) \cdot P(S_0 | H_3) + \\
 & + P(H_1) \cdot P(S_1 | H_1) + P(H_2) \cdot P(S_1 | H_2) + P(H_3) \cdot P(S_1 | H_3) + \\
 & + P(H_1) \cdot P(S_2 | H_1) + P(H_2) \cdot P(S_2 | H_2) + P(H_3) \cdot P(S_2 | H_3) + \\
 & + P(H_1) \cdot P(S_3 | H_1) + P(H_2) \cdot P(S_3 | H_2) + P(H_3) \cdot P(S_3 | H_3)]. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Предположим, что плотность распределения случайной величины (СВ) снижения эффективности элемента КИО вследствие атак на временном интервале $[t_0, t_0 + \tau]$ известна, тогда (3) для различных режимов тестирования КИО запишется в виде:

$$\begin{aligned}
 H_{S_1} = & - \int_{t_0}^{t_0 + \tau} f_{S_1}(t) dt \cdot [\ln \int_{t_0}^{t_0 + \tau} f_{S_1}(t) dt], H_{S_2} = - \int_{t_0}^{t_0 + \tau} f_{S_2}(t) dt \cdot [\ln \int_{t_0}^{t_0 + \tau} f_{S_2}(t) dt], \\
 H_{S_3} = & - \int_{t_0}^{t_0 + \tau} f_{S_3}(t) dt \cdot [\ln \int_{t_0}^{t_0 + \tau} f_{S_3}(t) dt], H_{S_\xi} = - \int_{t_0}^{t_0 + \tau} f_{S_\xi}(t) dt \cdot [\ln \int_{t_0}^{t_0 + \tau} f_{S_\xi}(t) dt]. \quad (4)
 \end{aligned}$$

где f_{S_k} – плотность распределения вероятностей СВ времени наработки на отказ КИО.

Результаты моделирования энтропии элементов КИО на основе различных законов распределения.

На рисунке 2 представлены результаты моделирования энтропии элементов КИО на основе распределения Релея в зависимости от τ и $t_0 = 2$ и $\sigma = 0, \dots, 15$ на основе приведенных в таблице 1 данных.

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования энтропии элемента КИО

$\tau \backslash t$	0	0,1	0,2	0,4	0,6	1,0	1,2	1,5	2,0
$t_0 + \tau$	2,0	2,1	2,3	2,5	2,7	-	-	-	-
$t_1 + \tau$	2,5	-	-	-	-	3,5	3,7	4,0	4,5

По результатам моделирования энтропии элемента КИО, приведенных на рисунке 2, можно видеть, что при увеличении τ , значение энтропии H_{S_i} возрастает, что также наблюдается при изменении (сдвиге вправо) с $t_0 = 2$ до $t_1 = 2.5$.

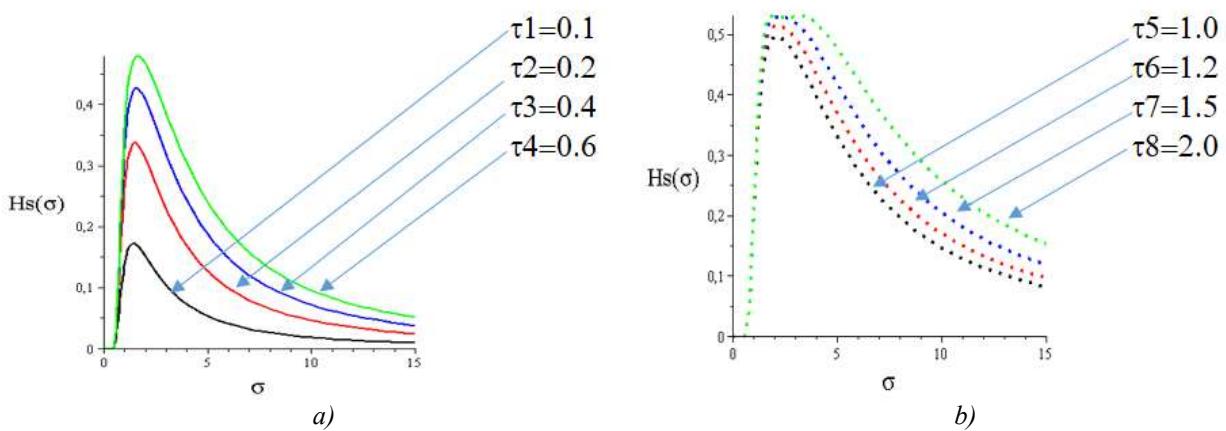


Рисунок 2 – Результаты моделирования энтропии элемента КИО на основе распределения Релея в зависимости от τ и t_0 : а) $t_0 = 2$; б) $t_0 = 2.5$

Проведем моделирование H_{S_i} из выражения (4) для логарифмически-нормального закона распределения

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t \in (-\infty, 0), \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], & t \in (0, \infty), \end{cases} \quad (5)$$

где $\sigma > 0$.

С учетом (5), выражение (4) примет вид:

$$H_{S_i} = - \int_{t_0}^T \left[\int_{t_i}^{t_i+\tau} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t_i} \exp G \right) (t_i) dt_i \cdot \left[\ln \int_{t_i}^{t_i+\tau} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t_i} \exp G \right) (t_i) dt_i \right] \right] dT, \\ G = \left[-\frac{(\ln t_i - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]; i = \overline{1, N}; [t_i, t_i + \tau] \leq [t_0, T]. \quad (6)$$

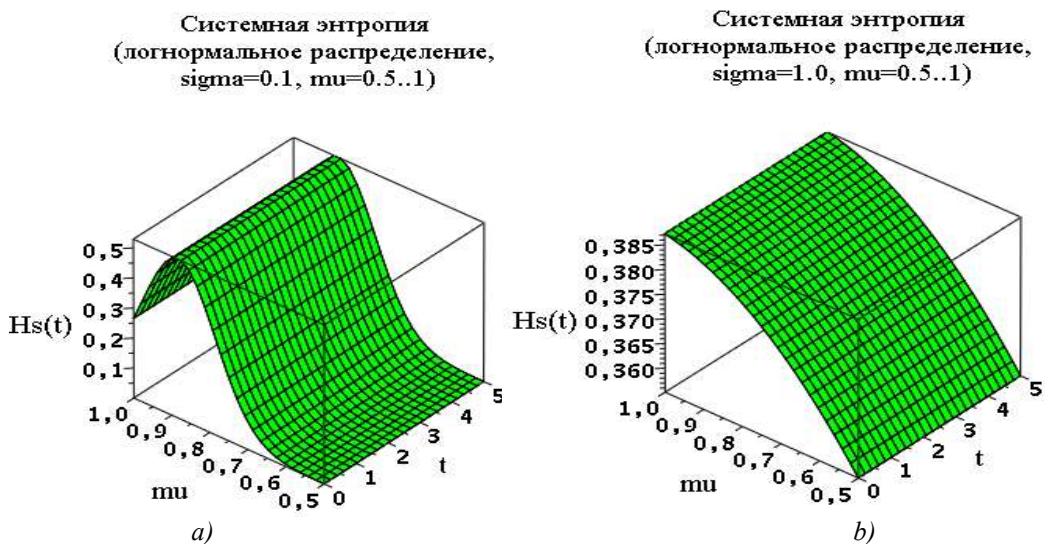


Рисунок 3 – Результаты моделирования энтропии элемента КИО на основе логарифмического нормального распределения при $\mu_1 = 0.5, \dots, 1.0$ в зависимости от σ : а) $\sigma = 0.1$; б) $\sigma = 1.0$

На рисунке 3 представлены результаты моделирования энтропии элементов КИО на основе логарифмического нормального распределения в зависимости от $\mu = 0.5, \dots, 1.0$, пределах интегрирования (6) $t_0 = 2.5$, $t_0 + \tau = 3.5$, параметрах распределения $\sigma_1 = 0.1$ и $\sigma_2 = 1.0$ при $t = 0, \dots, 5$.

При увеличении параметра распределения от $\sigma = 0.1$ до $\sigma = 1$, на рисунке 4 приведены результаты моделирования энтропии элементов КИО на основе логарифмического нормального распределения при $\mu_2 = 0.5, \dots, 2.0$.

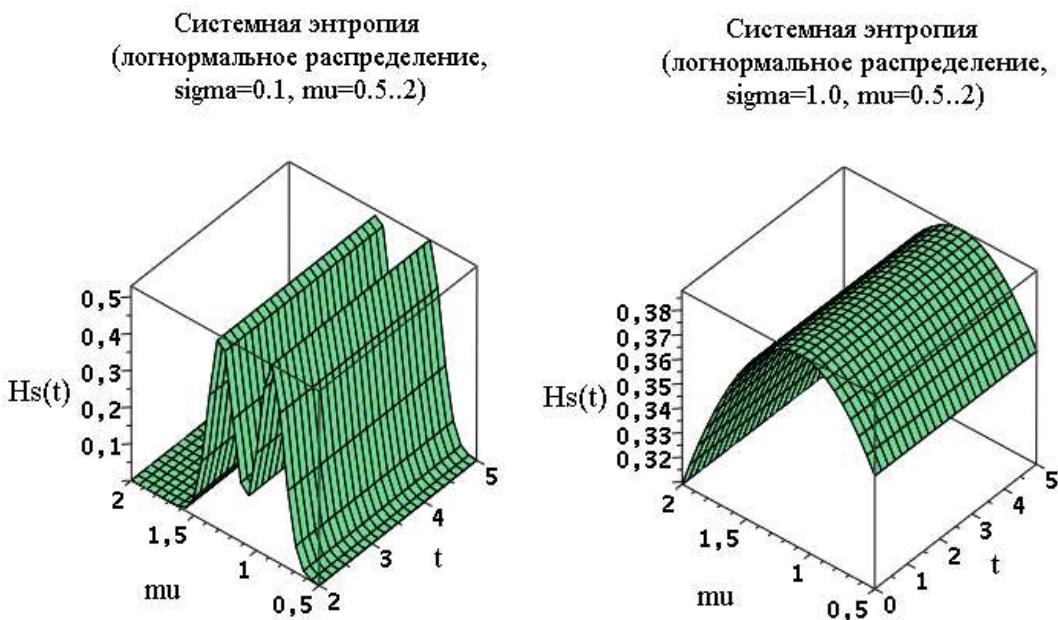


Рисунок 4 – Результаты моделирования энтропии элемента КИО на основе логарифмического нормального распределения в зависимости от σ : a) $\sigma = 0.1$; b) $\sigma = 1.0$

На рисунке 5-6 представлены результаты моделирования энтропии элементов КИО на основе логарифмического нормального распределения в зависимости от $\mu_1 = 0.5, \dots, 1.0$, $\mu_2 = 0.5, \dots, 2.0$ и $\sigma_1 = 0.1$, $\sigma_2 = 1.0$ при изменении пределов интегрирования $t_0 = 2.0$, $t_0 + \tau = 2.1$.

По результатам моделирования энтропии элемента КИО, приведенных на рисунке 3 – рисунке 6, можно видеть, что при увеличении времени, значение энтропии H_{S_1} возрастает, но имеет сложный рельеф моделирующей поверхности.

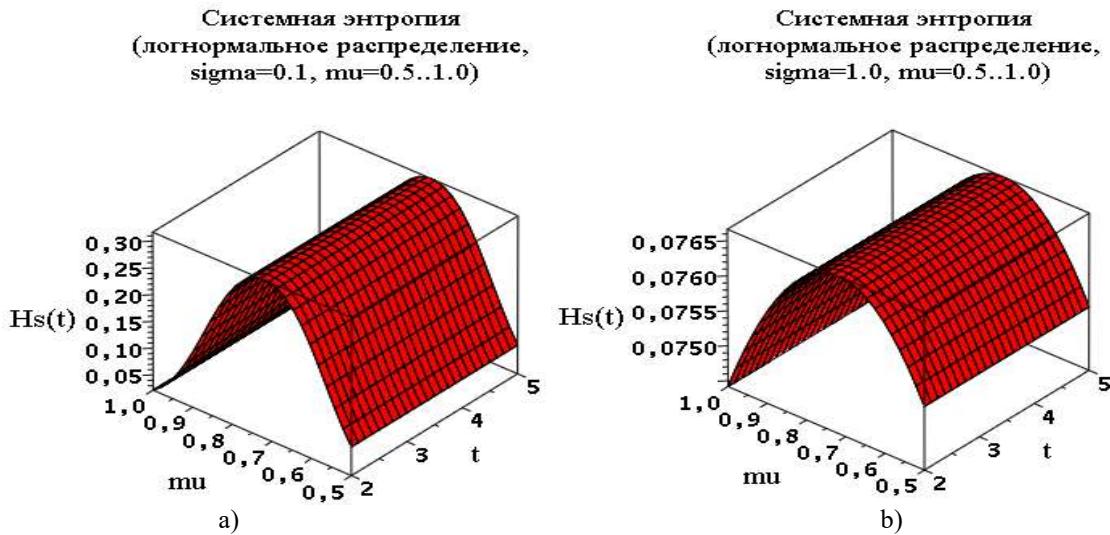


Рисунок 5 – Результаты моделирования энтропии элемента КИО на основе логарифмического нормального распределения при $\mu_1 = 0.5, \dots, 1.0$ в зависимости от σ : a) $\sigma = 0.1$; b) $\sigma = 1.0$

Применение аналитического подхода для поддержки принятия решений по определению состояния КИО затруднительно в силу вычислительных сложностей и неудовлетворительной адекватности из-за условий, накладываемых на параметры распределений. В этом случае для получения библиотеки энтропий и формирования правил вывода решений для ЛПР целесообразно использовать имитационное моделирование.

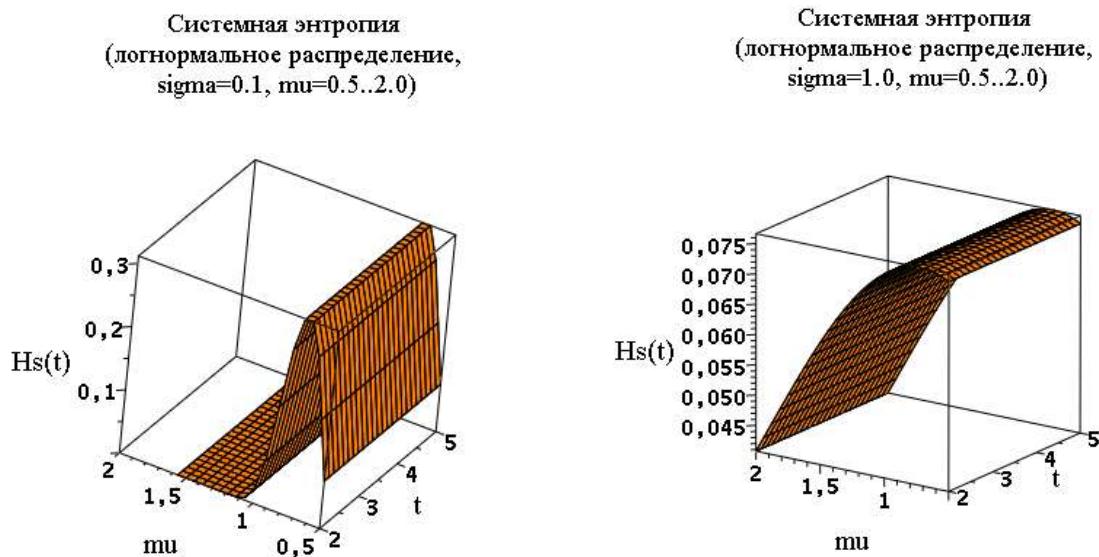


Рисунок 6 – Результаты моделирования энтропии элемента КИО на основе логарифмического нормального распределения при $\mu=0.5..2.0$ в зависимости от σ : а) $\sigma=0.1$; б) $\sigma=1.0$

Архитектура предлагаемого моделирующего стенда. Целью программного имитационного моделирующего стенда (ИМС) является поддержка принятия решений по обнаружению аномалий энтропии элементов КИО (в рассматриваемом случае: кодер, канал передачи, декодер). ИМС должен обеспечивать следующие функции.

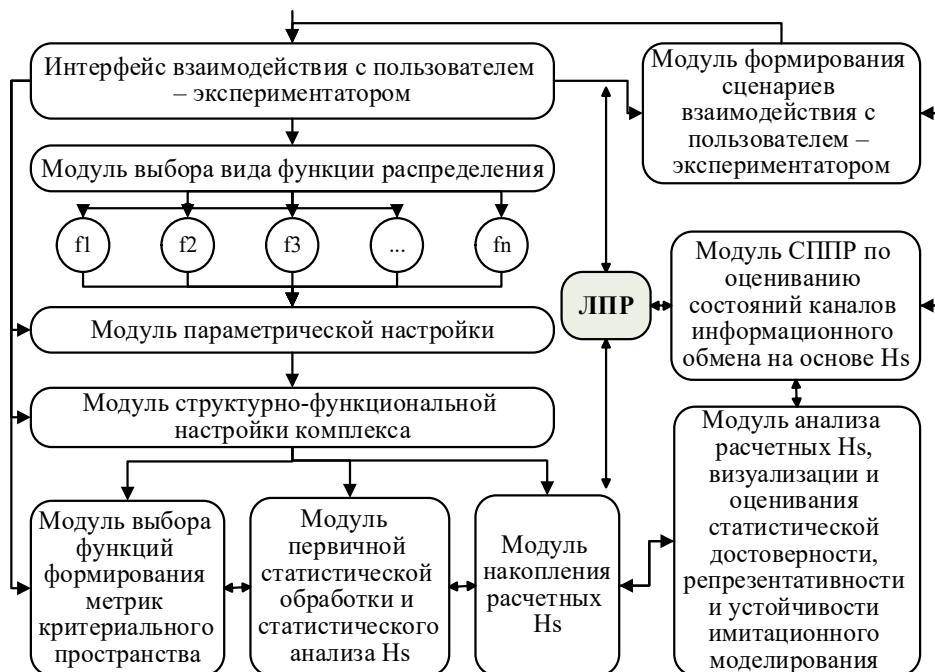


Рисунок 7 – Функционально-структурная схема моделирующего стенда оценивания состояний КИО

1. Моделирование динамики состояния как в рамках одного из элементов КИО, так и для КИО в целом.
2. Проверка статистической достоверности, репрезентативности и устойчивости проводимых имитационных экспериментов.

3. Гибкая настройка параметров модели под выбранный сценарий реализации имитационного эксперимента.

4. Вывод результатов моделирования на различных уровнях абстракции в виде, удобном для ЛПР.

На основе приведенных выводов в рамках оценивания состояния КИО на основе энтропийной модели, предложена функционально-структурная схема моделирующего стенда, рисунок 7.

Список задач, подлежащих исследованию в рамках статистических исследований оценивания состояния КИО, порождает список альтернативных сценариев [14-22]. Каждый сценарий имеет индивидуальные настройки управляющей переменной для выбора соответствующей траектории вычислительного процесса, соответствующей этому исследованию на стенде.

1. Влияние изменения времени анализа τ на рост энтропии анализируемого элемента или КИО в целом.

2. Влияние вида закона распределения на результат оценивания состояния КИО.

3. Влияние параметров правил принятия решений в СППР о наличии уязвимости в КИО на оценку энтропии его состояния.

4. Обоснование периодичности профилактических мероприятий по сохранению работоспособности состояний КИО по отношению к уязвимостям.

Заключение

На основе предложенной энтропийной модели построена функционально-структурная схема моделирующего стенда оценивания состояний каналов информационного обмена, которая представляет собой основу создания системы поддержки принятия решений по обеспечению защиты систем с коммуникационными связями. Лицу, принимающему решения, доступны рычаги управления параметрами моделирования характеристик КИО; взаимодействие с экспериментатором, который может выступать в роли ЛПР эксперта (ЛПРЭ). Решение конкретных задач, сформулированных в данном исследовании возможно на основе предложенного стенда в рамках обеспечения устойчивого функционирования КИО в условиях атак.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев Г.Н., Евтеев А.В. Устойчивость слежения за задержкой фазоманипулированных сигналов с расширением спектра в системах синхронизации радиотехнических систем // Информатика и автоматизация. 2021. №20/1. С.16–42.
2. Gordon L.A., Loeb M.P., Lucyshyn W., Richardson R. CSI/FBI Computer Crime and Security Survey // Computer Security Institute Publications. 2005. 26 p.
3. Zander S., Armitage G., and Branch P. A Survey of Covert Channels and Countermeasures in Computer Network Protocols accepted for publication // IEEE Commun. Surveys and Tutorials, vol. 9, no. 3. Oct.2007. pp. 44–57.
4. Тумоян Е.П. Методы формального моделирования сетевых атак // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 108 – 113.
5. Фёдоров, В. К. Энтропийная модель долгосрочного развития электроэнергетических систем, призванная обеспечить согласование технической и экономической политики в сфере электроэнергетики / В. К. Фёдоров, И. В. Фёдоров // Энергетика и энергосбережение: межвуз. сб. науч. тр. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – С. 274–286.
6. Бубнов А. В., Фёдоров И. В., and Полянцев Л. Г.. Энтропийная модель взаимосвязи электроэнергетики и экономики// Омский научный вестник, no. 2 (120), 2013, pp. 168-178.
7. Доронина Ю.В., Скатков А.В. Анализ статистической устойчивости стационарных марковских моделей // Труды СПИИРАН. 2019. № 5(18). С. 1119–1148.
8. Скатков А.В. Адаптивное обнаружение уязвимостей интерфейсов беспилотных транспортных средств / Доронина, Ю. В., А. А. Брюховецкий, Д. В. Моисеев и др. // Научная монография. – Симферополь: ООО «Ариал», 2020. – 352с.
9. Скатков А.В. Структурный синтез каналов информационных обменов для беспилотных транспортных средств / Доронина, Ю. В., А. А. Брюховецкий, Ю. В. Доронина, Д. В. Моисеев и др.// Монография. – Симферополь: ООО «Ариал», 2020. – 320с.
10. Laaksonen O., Peltoniemi M. The essence of dynamic capabilities and their measurement // International Journal of Management Reviews. British Academy of Management.2018. vol. 20(2). pp. 184–205.
11. Казимир В.В., Серая А.А.. Метод построения моделей информационных атак // Математические машины и системы, vol. 1, no. 4, 2010, pp. 52-61.
12. Татаринов В. И. Модель системы управления сетью передачи данных специального назначения в условиях компьютерных сетевых атак // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, no. 11, 2021, pp. 194-196.

13. Воробьев С.П., Давыдов А.Е. и др. Инфокоммуникационные сети: энциклопедия. Том 3. Методы анализа и оптимизации структуры, архитектуры и жизненного цикла инфокоммуникационных сетей. СПб.: Наукоемкие технологии, 2019. С. 115-122.
14. Modeling of monitoring processes of structurally heterogeneous technological objects / A. Skatkov, V. Shevchenko, D. Voronin, D. Moiseev // MATEC Web of Conferences (Sevastopol, 11–15 September, 2017). – 2017. – Vol. 129. – P. 03022.
15. Шокин, А. Г. Новые методы помехо-устойчивого кодирования информации / А. Г. Шокин, Н. Е. Сапожников, Д. В. Моисеев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 6, № 9(60). – С. 26-30.
16. Оценка погрешностей выполнения вероятностных арифметических операций сложения и умножения / Н. Е. Сапожников, Д. В. Моисеев, П. С. Бейнер, Н. В. Бейнер // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 3, № 4(63). – С. 40-42.
17. Мера Кульбака в задачах динамической кластеризации наблюдений состояния окружающей среды / А. В. Скатков, А. А. Брюховецкий, Д. В. Моисеев, Ю. Е. Шишkin // Системы контроля окружающей среды. – 2019. – № 3(37). – С. 35-38. – DOI 10.33075/2220-5861-2019-3-35-38.
18. Скатков, А. В. Мониторинг структурно-неоднородных объектов в облачных вычислительных средах / А. В. Скатков, А. А. Брюховецкий, Д. В. Моисеев // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2017 : Сборник статей по материалам научно-практической конференции с международным участием, Севастополь, 11–15 сентября 2017 года / Под редакцией Ю.А. Омельчук, Н.В. Ляминой, Г.В. Кучерик. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2017. – С. 1236-1238. – EDN YNKROP.
19. Skatkov, A. V. Model for vulnerabilities detection in unmanned vehicle interfaces based on artificial immune systems / A. V. Skatkov, D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetskiy // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, 04 марта 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 1515. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 22043. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022043.
20. Bryukhovetskiy, A. Research of the model for detecting UMV interfaces vulnerabilities based on information criterion / A. Bryukhovetskiy, V. Miryanova, D. Moiseev // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, 28 мая 2021 года. Vol. 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – P. 162-168. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-162-168. Moiseev, D. Method for detecting vulnerabilities of unmanned vehicle interfaces based on continuous values discretization / D. Moiseev, A. Bryukhovetskiy // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, 28 мая 2021 года. Vol. 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – P. 43-47. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-43-47.
21. Moiseev, D. V. Intelligent decision - making support on the level of encryption of information transmitted in the UMV information exchange channels D V Moiseev, A A Bryukhovetskiy and A V Skatkov / D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetskiy, A. V. Skatkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, 18–21 ноября 2019 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 734. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 12086. – DOI 10.1088/1757-899X/734/1/012086.
22. Moiseev, D. Models of the threat of virus idea dissemination in information-telecommunication networks / D. Moiseev, V. Miryanova // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, 28 мая 2021 года. Vol. 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – P. 175-180. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-175-180.

Скатков Александр Владимирович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные технологии и системы» 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +7862417741 (добавочный 1384),
AVSkatkov@mail.sevsu.ru

Доронина Юлия Валентиновна

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы» 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +7862417741 (добавочный 1384),
YVDoronina@mail.sevsu.ru

Моисеев Дмитрий Владимирович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Доктор технических наук, доцент, директор инновационно-образовательного центра «Центр ИИ СевГУ», декан Факультета Информационных технологий, заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы» 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
+7 (8692) 41-77-41, доб. 1028,
DVMoiseev@mail.sevsu.ru

Цофнас Денис Андреевич

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Ассистент кафедры «Информационные технологии и системы» 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +7862417741 (добавочный 1384),
DATsofnas@mail.sevsu.ru

SKATKOV A.V., DORONINA YU.V., MOISEEV D.V., TSOFNAS D.A.

MODELING OF INFORMATION EXCHANGE CHANNEL CONDITION ESTIMATES BASED ON THE ENTROPY MODEL

Abstract. The method of testing the state of information exchange channels based on the entropy model is considered. It is shown that parametric adjustment and choice of the distribution law of a random variable characterizing the functioning of a separate element of the information exchange channel significantly affects its entropy, and with increasing time, the entropy value increases and has a complex relief of the modeling surface. A functional-structural scheme of a modeling stand for evaluating the states of information exchange channels is proposed. The solution of the specific tasks formulated in this study is possible on the basis of the proposed stand within the framework of ensuring the stable functioning of information channels in the conditions of attacks.

Keywords: information exchange channel, channel state testing, entropy model, modeling stand, decision support system.

BIBLIOGRAPHY

1. Maltsev G. N., Evteev A.V. Stability of tracking the delay of phase-manipulated signals with spectrum expansion in synchronization systems of radio engineering systems // Informatics and Automation. 2021. No.20/1.Pp. 16-42.
2. Gordon L.A., Loeb M.P., Lucyshyn W., Richardson R. CSI/FBI Computer Crime and Security Survey // Computer Security Institute Publications. 2005. 26 p.
3. Zander S., Armitage G., and Branch P. A Survey of Covert Channels and Countermeasures in Computer Network Protocols accepted for publication // IEEE Commun. Surveys and Tutorials, vol. 9, no. 3. Oct.2007. pp. 44–57.
4. Tumoyan E. P. Methods of formal modeling of network attacks // Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Technical Sciences. - 2007. - No. 1. – pp. 108-113.
5. Fedorov, V. K. Entropic model of long-term development of electric power systems, designed to ensure the agreement of technical and economic policy in the field of electric power industry / V. K. Fedorov, I. V. Fedorov // Energy and energy conservation: Interuniversity collection of scientific papers - Omsk: Ed.in OmGTU, 2011. - pp. 274-286.
6. Bubnov A.V., Fedorov I. V., and Polyntsev L. G. The entropy model of the relationship between the electric power industry and economics// Omsk Scientific Bulletin, No. 2 (120), 2013, pp. 168-178.
7. Doronina Yu. V., Skatkov A.V. Analysis of statistical stability of stationary Markov models // Proceedings of SPIIRAN. 2019. No. 5(18). pp. 1119-1148.
8. Skatkov A.V. Adaptive vulnerability detection of interfaces of unmanned vehicles / Doronina, Yu. V., A. A. Bryukhovetsky, D. V. Moiseev et al. / Scientific monograph. Simferopol: Arial LLC, 2020. 352s.
9. Skatkov A.V. Structural synthesis of information exchange channels for unmanned vehicles / Doronina, Yu. V., A. A. Bryukhovetsky, Yu. V. Doronina, D. V. Moiseev et al.// Monograph. Simferopol: Arial LLC, 2020. 320c.
10. Laaksonen O., Peltoniemi M. The essence of dynamic capabilities and their measurement // International Journal of Management Reviews. British Academy of Management.2018. vol. 20(2). pp. 184-205.
11. Kazimir V. V., Seraya A. A. Method of constructing models of information attacks // Mathematical Machines and Systems, vol. 1, No. 4, 2010, pp. 52-61.
12. Tatarinov V. I. A model of a special-purpose data transmission network management system in the context of computer network attacks // Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Technical Sciences, No. 11, 2021, pp. 194-196.
13. Vorobyov S. P., Davydov A. E. et al. Infocommunication networks: an encyclopedia. Volume 3. Methods of analysis and optimization of the structure, architecture and life cycle of infocommunication networks. St. Petersburg: Scientific Technologies, 2019. pp. 115-122.
14. Modeling of monitoring processes of structurally heterogeneous technological objects / A. Skatkov, V. Shevchenko, D. Voronin, D. Moiseev // MATEC Web of Conferences (Sevastopol, September 11-15, 2017). – 2017. – Vol. 129. – P. 03022.
15. Shokin, A. G. New methods of interferencestable coding of information / A. G. Shokin, N. E. Sapozhnikov, D. V. Moiseev // East European Journal of Advanced Technologies. - 2012. - Vol. 6, No. 9 (60). - pp. 26-30.
16. Estimation of errors in performing probabilistic arithmetic operations of addition and multiplication / n. E. Sapozhnikov, D. V. Moiseev, P. S. Beiner, N. V. Beiner // East European Journal of Advanced Technologies. 2013. Vol. 3, No. 4 (63). pp. 40-42.
17. The Kullback measure in problems of dynamic clustering of observations of the state of the environment / A.V. Skatkov, A. A. Bryukhovetsky, D. V. Moiseev, Yu. E. Shishkin // Environmental control systems. – 2019. – № 3(37). - Pp. 35-38. - DOI 10.33075 / 2220-5861-2019-3-35-38.
18. Skatkov, A.V. Monitoring of structurally heterogeneous objects in cloud computing environments / A.V. Skatkov, A. A. Bryukhovetsky, D. V. Moiseev // Environmental, industrial and energy security - 2017 : A collection of articles based on the materials of a scientific and practical conference with international participation, Sevastopol, September 11-15, 2017 / edited by Yu. A. Omelchuk, N. V. Lyamina, G. V. Kucherik. Sevastopol: Federal State

Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", 2017. pp. 1236-1238. - EDN YNKPOK.

19. Skatkov, A.V. Model for vulnerabilities detection in unmanned vehicle interfaces based on artificial immune systems / A.V. Skatkov, D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetskiy // Jop Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnodar, March 04, 2020 / Krasnodar Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 1515. – Krasnodar, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 22043. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022043.

20. Bryukhovetskiy, A. Research of the model for detecting UMV interfaces vulnerabilities based on information criterion / A. Bryukhovetskiy, V. Miryanova, D. Moiseev // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnodar, May 28, 2021. Vol. 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – P. 162-168. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-162-168. Moiseev, D. Method for detecting vulnerabilities of unmanned vehicle interfaces based on continuous values discretization / D. Moiseev, A. Bryukhovetskiy // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnodar, May 28, 2021. Vol. 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – P. 43-47. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-43-47.

21. Moiseev, D. V. Intelligent decision - making support on the level of encryption of information transmitted in the UMV information exchange channels D V Moiseev, A A Bryukhovetskiy and A V Skatkov / D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetskiy, A.V. Skatkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnodar, November 18-21, 2019 / Krasnodar Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 734. – Krasnodar: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 12086. – DOI 10.1088/1757-899X/734/1/012086.

22. Moiseev, D. Models of the threat of virus idea dissemination in information-telecommunication networks / D. Moiseev, V. Miryanova // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnodar, May 28, 2021. Vol. 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – P. 175-180. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-175-180.

Skatkov Alexander Vladimirovich

Sevastopol State University, Sevastopol
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the
Department of Information Technologies and Systems
33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053,
Tel. +7862417741 (extension 1384),
AVSkatkov@mail.sevsu.ru

Doronina Julia Valentinovna

Sevastopol State University, Sevastopol
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department of Information
Technologies and Computer Systems
33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053,
Tel. +7862417741 (extension 1384),
YVDoronina@mail.sevsu.ru

Moiseev Dmitry Vladimirovich

Sevastopol State University, Sevastopol
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Director of the SevSU AI Center for Innovation and
Education, Dean of the Faculty of Information
Technology, Head of the Department of Information
Technologies and Systems
33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053
+7 (8692) 41-77-41, ext. 1028,
DVMoiseev@mail.sevsu.ru

Tsofnas Denis Andreevich

Sevastopol State University, Sevastopol
Assistant Professor of the Department of Information
Technologies and Systems
33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053,
Tel. +7862417741 (extension 1384),
DATsofnas@mail.sevsu.r

© Скатков А.В., Доронина Ю.В., Моисеев Д.В., Цофнас Д.А., 2025

ОПТИМИЗАЦИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГИДРОЦИЛИНДРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ

Аннотация. Гидравлические цилиндры производственных агрегатов в процессе эксплуатации меняют свои технические характеристики по причине износа соприкасающихся поверхностей штока и направляющего цилиндра. Аbrasiv, который при этом появляется, повреждает рабочие поверхности гидроцилиндра. Для предотвращения отмеченных негативных явлений без полной замены элементов гидроцилиндра производится периодическое восстановление их в пределах системы ремонтных размеров. Стохастический характер процессов как получения дефектов, так и восстановления деталей приводит к ненулевой вероятности необратимо испортить деталь, выбрав весь припуск и не устранив дефект. Снижение вероятности такого исхода обработки представляет, таким образом, актуальную задачу. Основой предлагаемого метода является описание процесса восстановления штока гидроцилиндра как полумарковского процесса с непрерывным временем и дискретным пространством состояний, на который наложены ограничения по длительности отдельных фаз обработки, по достижении которых происходит выход из цикла. Для практического применения предлагаемого подхода требуются статистические данные по распределению времени обработки. Получены расчетные формулы для вероятностей успешного и неудачного исходов восстановления штока гидроцилиндра шлифованием и полированием по критерию сохранения толщины детали в сочетании с отсутствием концентрированных дефектов. Предложены организационные рекомендации по увеличению выхода годных деталей после обработки и снижению среднего времени обработки одной детали.

Ключевые слова: гидроцилиндр, финишная обработка, шлифование, полирование, среднее время обработки, вероятность успешного завершения.

Введение. Линейные гидроцилиндры входят в состав многих производственных агрегатов [1]. Особенность их функционирования состоит в циклическом перемещении поршня по внутренней поверхности корпуса гидроцилиндра. При этом происходит износ контактирующих поверхностей и появляется абразив, который вовлекается в рабочую среду и нарушает их технические характеристики. В случае, когда поверхности штока открываются, то в гидросистему попадают твердые частицы из окружающей среды и вызывают явления, сходные с происходящими в установке для гидроабразивной обработки.

Помимо непосредственного уменьшения эксплуатационной способности изнашивающихся элементов конструкции (которое, как правило, невелико и компенсируется проектным запасом прочности), абразивные частицы создают концентраторы напряжений, приводящие к усталостным повреждениям [2]. Кроме того, износ прецизионных пар под высоким давлением в рабочей среде приводит к увеличению его протечек и созданию токсичных и пожароопасных испарений.

Устойчивость к неблагоприятным факторам гидросистемы повышается при использовании гидроцилиндров в приводах с несколькими степенями свободы, поскольку существует возможность регулировать скорость и давление подаваемой рабочей жидкости [1]. Тем не менее, вследствие эксплуатационного износа контактирующих поверхностей, также появляются отказы и происходит снижение коэффициента полезного действия гидравлического привода [2].

Техническое обслуживание агрегатов с гидроцилиндрами требует периодического восстановления соприкасающихся поверхностей, подвергшихся абразивному износу до номинальных параметров [3]. При этом возникает проблема неочевидности результата ремонтно-восстановительных работ [4] и [5], так как существует ненулевая вероятность снять слишком много материала и не устраниить дефект.

В большинстве случаев для коррекции поверхности применяются два основных режима съёма материала – шлифование и полирование, отличающихся скоростью и уровнем шероховатости получаемой поверхности. Крупный дефект удаляется быстрым сошлифовыванием, мелкие могут быть удалены полированием.

Вместе с тем, в ходе обработки могут вскрыться новые дефекты, для устранения которых требуется повторить цикл. Процесс может повторяться много раз с неизменным понижением поверхности, в результате появляется ненулевая вероятность выбрать весь ремонтный размер и не устраниить лимитирующие дефекты. В этом случае возможно наращивание материала с последующей его обработкой.

Для управления процессом корректирования поверхности существенное значение приобретают правила перехода между фазами шлифования и полирования [6],[7], от которых,

как будет показано ниже, зависит вероятность успешного завершения обработки получением изделия без дефектов и укладывающегося в заданный ремонтный размер.

В настоящей работе рассмотрим следующую схему обработки: сеансы полирования и шлифования проводятся последовательно. Полирование завершается или по времени, или в случае вскрытия нового дефекта, шлифование – только по времени. Время шлифования устанавливается, исходя из глубины обнаруженного дефекта в ходе сеанса контроля, которая при аналитическом моделировании процесса рассматривается как случайная величина. Выход из цикла производится или если полирование завершилось в расчетное время без новых дефектов, или если суммарное время шлифования оказалось больше величины, при которой снимается материал ремонтного размера.

Используя такой подход, мы предварительно составим функционалы, выражающие вероятность успешного завершения ремонтно-восстановительных работ и среднее время обработки одного изделия через функции распределения продолжительностей шлифования и полирования как случайных величин, затем оптимизируем их с целью максимизации вероятности успешного завершения обработки и минимизации её продолжительности.

Полученные оценки используем для организационных рекомендаций.

Цель работы:

Получить организационные рекомендации для максимизации вероятности успешного завершения и минимизации среднего времени ремонтных работ для технологического процесса восстановления штока гидроцилиндра производственного агрегата.

Материал исследования.

Представим процесс финишной обработки происходящим в виде двух фаз: полирования, которое используется непосредственно для придания изделию требуемой формы, и шлифования, которое используется для быстрой коррекции, в случае, если сеанс контроля показал наличие концентрированных дефектов, не укладывающихся в допуски.

Практически для такой обработки потребуется оборудование с аналого-цифровой обработкой сигнала и возможностью контроля обрабатываемой поверхности с помощью системы технического зрения.

Длительность обработки полированием до получения или вскрытия критического дефекта выразим через случайную величину α , длительность устранения дефекта шлифованием до цилиндра равной шероховатости выразим через случайную величину β .

Будем искать как вероятность успешного завершения процесса так и среднее время обработки как функционал, максимум и минимум которого достигается подбором функций распределения этих величин.

Кроме того необходимо определить следующие постоянные величины: время устранения обнаруженных дефектов при заданной интенсивности удаления материала полированием (обозначим его через h_1) и допустимое общее время шлифования (обозначим его через h_2).

Оценки вероятностей успешного и неудачного исходов обработки

Последовательно проведенную пару процессов полирования и шлифования будем рассматривать как цикл, который может завершиться тремя исходами: обработка завершена успешно (деталь восстановлена), обработка завершена неудачно (снято слишком много материала и деталь испорчена), обработка переносится на следующий цикл (в ходе полирования возник новый концентрированный дефект, который также требуется устранить шлифованием, например, в результате заноса на оборудование абразивной частицы [8],[9]).

Обозначим следующие условия завершения обработки одной детали:

$$(\alpha_i > h_1) \cup \left(\sum_{i=1}^n \beta_i > h_2 \right), \quad (1)$$

где h_1 – временной интервал, при непрерывном полировании в течение которого деталь оказывается восстановленной, h_2 – временной интервал, по истечении которого с заготовки снимается недопустимо большой слой материала при шлифовании, после чего деталь не может быть получена.

Считаем продолжительности обработки полированием α_i на разных циклах независимыми одинаково распределенными случайными величинами с функцией распределения $F(t)$, плотностью вероятности $f(t)$ и конечным математическим ожиданием $M\alpha$.

Также считаем продолжительности устранения дефектов шлифованием β_i независимыми одинаково распределенными случайными величинами с функцией распределения $G(t)$, плотностью вероятности $g(t)$ и конечным математическим ожиданием $M\beta$.

Рассмотрим события, связанные с последовательно выполненными циклами.

Запишем вероятности исходов первого цикла.

- Деталь восстановлена. Время до отказа на первом цикле полирования оказалось больше времени, необходимого для восстановления детали:

$$P_{1+} = P\{\alpha_1 > h_1\}. \quad (2)$$

Используя свойства функции распределения, получим

$$P_{1+} = 1 - F(h_1) = \bar{F}(h_1), \quad (3)$$

где знак инверсии обозначает операцию «из единицы вычесть ту величину, над которой он расположен», эту запись мы будем использовать и в дальнейшем. Полученная таким образом из функции распределения функция носит название функции обеспеченности.

- Деталь испорчена: Время до отказа на первом цикле обработки оказалось меньше времени, необходимого для восстановления детали, при этом время до устранения дефекта на первом цикле шлифования оказалось больше суммарного времени, допустимого на всю обработку шлифованием:

$$P_{1-} = P\{(\alpha_1 < h_1) \cap (\beta_1 > h_2)\}. \quad (4)$$

Используя свойства функции распределения, независимости событий и введенные обозначения, получим

$$P_{1-} = F(h_1) \cdot \bar{G}(h_2). \quad (5)$$

- Обработка переносится на второй цикл. Время до отказа на первом цикле обработки оказалось меньше времени, необходимого для восстановления детали, при этом время шлифования на первом цикле оказалось меньше суммарного времени, допустимого на всю обработку шлифованием:

$$P_{10} = P\{(\alpha_1 < h_1) \cap (\beta_1 < h_2)\}. \quad (6)$$

Применяя аналогичный предыдущему случаю математический аппарат, запишем

$$P_{10} = F(h_1) \cdot G(h_2). \quad (7)$$

Необходимым условием перехода ко второму циклу является выполнение соотношения (6), которое будет учитываться во всех последующих формулах.

Вероятности исходов второго цикла принимают вид:

- Деталь восстановлена. Произошел переход ко второму циклу и время до отказа в течение обработки оказалось больше времени, необходимого для восстановления детали

$$P_{2+} = P\{(\alpha_1 < h_1) \cap (\beta_1 < h_2) \cap (\alpha_2 > h_1)\}. \quad (8)$$

Учитывая формулы (2) и (5), получим

$$P_{2+} = F(h_1) \cdot G(h_2) \cdot \bar{F}(h_1). \quad (9)$$

Деталь испорчена. Произошел переход ко второму циклу, время до отказа на втором цикле обработки оказалось меньше времени, необходимого для восстановления детали, суммарное время шлифования на первом и втором циклах оказалось больше суммарного времени, допустимого на всю обработку шлифованием:

$$P_{2-} = P\{(\alpha_1 < h_1) \cap (\beta_1 < h_2) \cap (\alpha_2 < h_1) \cap (\beta_1 + \beta_2 > h_2)\}. \quad (10)$$

Используя допущение о независимости и идентичности распределения случайных величин β_1 и β_2 , получим

$$P_{2-} = F^2(h_1) \cdot G(h_2) \cdot \left(\bar{G}^{*(2)}(h_2) \right), \quad (11)$$

где $\bar{G}^{*(2)}(h_2) = \int_0^{h_2} G(t) \cdot g(h_2 - t) dt$ - свёртка двух функций распределения [10] времени до восстановления, взятая в точке h_2 ,

$\bar{G}^{*(2)}(h_2) = 1 - \int_0^{h_2} G(t) \cdot g(h_2 - t) dt$ - функция обеспеченности для свёртки второго порядка функций распределения, также взятая в точке h_2 .

- Обработка переносится на третий цикл. Произошел переход ко второму циклу, время до отказа на втором цикле обработки оказалось меньше времени, необходимого для восстановления детали, суммарное время шлифования на первом и втором циклах оказалось меньше суммарного времени, допустимого на всю обработку шлифованием:

$$P_{20} = P\{(\alpha_1 < h_1) \cap (\beta_1 < h_2) \cap (\alpha_2 < h_1) \cap (\beta_1 + \beta_2 < h_2)\}. \quad (12)$$

Действуя аналогично предыдущему случаю, получим

$$P_{20} = F^2(h_1) \cdot G(h_2) \cdot (G^{*(2)}(h_2)). \quad (13)$$

Продолжая процесс, запишем вероятности исходов для третьего цикла, необходимым условием перехода к которому будет выполнение условия (12):

- Деталь восстановлена:

$$P_{3+} = P\{(\alpha_1 < h_1) \cap (\beta_1 < h_2) \cap (\alpha_2 < h_1) \cap (\beta_1 + \beta_2 < h_2) \cap (\alpha_3 > h_1)\}, \quad (14)$$

$$P_{3+} = F^2(h_1) \cdot G(h_2) \cdot (G^{*(2)}(h_2)) \cdot \bar{F}(h_1). \quad (15)$$

- Деталь испорчена:

$$P_{3-} = P\{(\alpha_1 < h_1) \cap (\beta_1 < h_2) \cap (\alpha_2 < h_1) \cap (\beta_1 + \beta_2 < h_2) \cap (\alpha_3 < h_1) \cap (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 > h_2)\}, \quad (16)$$

$$P_{3-} = F^2(h_1) \cdot G(h_2) \cdot (G^{*(2)}(h_2)) \cdot \overline{(G^{*(3)}(h_2))}. \quad (17)$$

- Обработка переносится на четвертый цикл

$$P_{30} = P\{(\alpha_1 < h_1) \cap (\beta_1 < h_2) \cap (\alpha_2 < h_1) \cap (\beta_1 + \beta_2 < h_2) \cap (\alpha_3 < h_1) \cap (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 < h_2)\}, \quad (18)$$

$$P_{30} = F^2(h_1) \cdot G(h_2) \cdot (G^{*(2)}(h_2)) \cdot (G^{*(3)}(h_2)). \quad (19)$$

Найдем вероятность успешного завершения обработки с учетом всех возможных циклов. Рассматривая события восстановления детали на каждом из них как несовместные, просуммируем вероятности (3), (9), (15) и подобные им для следующих циклов, в результате получим вероятность P_+ успешного завершения процесса ремонтно-восстановительных работ

$$P_+ = \bar{F}(h_1) + \bar{F}(h_1) \cdot F(h_1) \cdot G(h_2) + \bar{F}(h_1) \cdot F^2(h_1) \cdot G(h_2) \cdot G^{*(2)}(h_2) + \\ + \bar{F}(h_1) \cdot F^2(h_1) \cdot \prod_{i=1}^3 G^{*(i)}(h_2) + \dots = \bar{F}(h_1) \cdot \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} F^n(h_1) \cdot \prod_{i=1}^n G^{*(i)}(h_2)\right). \quad (20)$$

В обозначениях (20) свёртка первого порядка полагается равной самой функции под знаком свёртки $G^{*(1)}(h_2) = G(h_2)$.

Тогда вероятность неудачного завершения обработки будет, соответственно, равна

$$P_- = F_1(h_1) - \bar{F}_1(h_1) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} F^n(h_1) \cdot \prod_{i=1}^n G^{*(i)}(h_2). \quad (21)$$

Оценки среднего времени ремонтно-восстановительных работ.

Рассмотрим вопрос о средней продолжительности ремонтно-восстановительных работ на одной детали вне зависимости от их успешности и без учета времени контроля.

Введем случайные величины $\lambda_i = \alpha_i + \beta_i$, которые, согласно принятым ранее допущениям, будут независимыми и одинаково распределенными. Обозначим их математическое ожидание через $M\lambda$.

Согласно общим свойствам математического ожидания,

$$M\lambda = M\alpha + M\beta. \quad (22)$$

Рассмотрим количество циклов s «полирование-шлифование», совершенное в процессе обработки одной детали, как дискретную случайную величину.

Запишем вероятности принятия этой величиной фиксированных значений, учитывая формулы (6), (12), (18) и подобные:

- Совершен ровно один цикл

$$p_1 = 1 - F(h_1) \cdot G(h_2). \quad (23)$$

- Совершено ровно два цикла

$$p_2 = F(h_1) \cdot G(h_2) \cdot (1 - F(h_1) \cdot G^{*(2)}(h_2)). \quad (24)$$

- Совершено ровно n циклов

$$p_n = F(h_1) \cdot \left(\prod_{i=1}^{n-1} G^{*(i)}(h_2) \right) \cdot (1 - F(h_1) \cdot G^{*(n)}(h_2)). \quad (25)$$

Вероятности (23) ... (25) образуют ряд распределения случайной величины s , используя который можно найти её математическое ожидание

$$Ms = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot p_n = F(h_1) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \left(\prod_{i=1}^{n-1} G^{*(i)}(h_2) \right) \cdot (1 - F(h_1) \cdot G^{*(n)}(h_2)). \quad (26)$$

При этом, как известно, сходимость числового ряда в правой части может не обеспечиваться, что должно быть предметом особого исследования при анализе технологического процесса.

В случае же конечного математического ожидания (26), среднее время обработки одной детали будет равно

$$M = M\lambda \cdot M_s. \quad (27)$$

Соотношения (20) и (27) определяют количественные характеристики эффективности процесса финишной обработки в виде коэффициента выхода годных и средней продолжительности изготовления одного изделия.

Для их применения требуются эмпирические оценки функций распределения времени шлифования и времени полирования, полученные путем сбора статистических данных или их теоретические оценки, полученные при анализе изменений, вносимых в технологический процесс.

При фиксированных значениях необходимого времени непрерывной финишной обработки h_1 предельно допустимого времени устранения дефектов шлифованием h_2 рассматриваемые величины могут применяться для сравнения различных технологических процессов по их эффективности.

Оптимизация ремонтно-восстановительного процесса

Общую задачу применительно к сформулированным целям исследования представим в виде

$$P_+ = \max, M = \min. \quad (28)$$

В рассматриваемой модели параметрами оптимизации будут спектры моментов рассмотренных величин α и β , рассматриваемые как переменные величины.

Также задачу можно представить как поиск функций распределения $F(t)$ и $G(t)$, максимизирующих функционал (20) и минимизирующих функционал (27).

Данная задача может быть решена численными методами.

Общими рекомендациями при заданных значениях h_1 и h_2 является повышение математического ожидания времени непрерывного полирования $M\alpha$ и снижение математического ожидания времени непрерывного шлифования $M\beta$.

Первая из этих величин может быть повышена тщательной очисткой смазочно-охлаждающей жидкости и исключением абразивной пыли в месте проведения ремонтно-восстановительных работ.

Математическое ожидание времени непрерывного шлифования в одном цикле, зависит от структуры дефекта, который определяется условиями эксплуатации. Снижение этой величины требует баланса между условиями эксплуатации и частотой проведения ТО и представляется темой дополнительного исследования.

Выводы.

В настоящей работе были разработаны рекомендации для повышения вероятности успешного завершения обработки, а также снижения среднего времени обработки одной детали при восстановительных работах на штоках гидроцилиндров производственных агрегатов.

Последовательно проведенные процессы обработки и устранения новых дефектов были рассмотрены как цикл, который может завершиться тремя исходами: обработка полированием завершена успешно (деталь восстановлена), возник дефект и устранение его шлифованием завершено неудачно (снято слишком много материала и деталь испорчена), обработка переносится на следующий цикл (возник дефект, устранение его шлифованием завершено успешно, но требуется снова начать обработку полированием).

В результате исследований были получены непосредственные расчетные формулы (18) и (25), которые показывают, что при неблагоприятных сочетаниях параметров технологического процесса возможны ситуации, когда среднее время ремонтно-восстановительных работ может неограниченно возрастать, а вероятность их успешного завершения – стремиться к нулю. Исключение такого режима обработки должно проверяться до его наступления.

В общем случае, полученная математическая модель показывает, что вероятность успешного завершения процесса может быть повышена при увеличении математического ожидания времени непрерывной обработки полированием и снижении математического ожидания времени устранения технологических дефектов.

Среднее время обработки одной детали линейно пропорционально сумме математических ожиданий времени непрерывного полирования и времени устранения дефекта, и не может быть сделано произвольно малым – при этом вероятность успешного завершения процесса обработки будет стремиться к нулю. С другой стороны, это время может неограниченно возрастать.

При этом возникает оптимизационная задача, при которой максимум вероятности успешного завершения и минимум среднего времени обработки находятся совместно. Эта задача, как и учет явлений технологической усталости [11]...[13] в ремонтных условиях, представляется предметом дополнительного исследования.

Применяемый подход представляется обладающим достаточной универсальностью для восстановления агрегатов с линейными гидроцилиндрами и рядом других схем гидропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li, R., Zhang, Y., Feng, Z., Xu, J., Wu, X., Liu, M., ... & Yuan, W. Review of the progress of energy saving of hydraulic control systems. *Processes* – 2023. v. 11 №12, p.3304.
2. Arola D., Williams C. L. Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces //International Journal of fatigue. – 2002. – v. 24. – №. 9. – p. 923-930.
3. Li, X., Zhao, Q., Tang, H., Yang, S., Lei, D., & Wang, X. Joint scheduling optimisation method for the machining and heat-treatment of hydraulic cylinders based on improved multi-objective migrating birds optimisation. *Journal of Manufacturing Systems* – 2024. – v.73, p. 170-191.
4. Сквородин В. Я., Антипов А. В. Влияние финишной отделочно-антифрикционной обработки валов на амплитудные параметры шероховатости поверхности //Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения. – 2018. – С. 387-391.
5. Goyal A., Singh H., Goyal R., Singh R, Singh S. Recent advancements in abrasive flow machining and abrasive materials: A review. *Materials Today: Proceedings* – 2022. v. 56, n.5. p. 3065-3072.
6. Safety of agricultural machinery and tractor maintenance planning with fuzzy logic and MCDM for agricultural productivity. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, v. 8 n.1, pp. 25-43.
7. Puška, A., Nedeljković, M., Šarkočević, Ž., Golubović, Z., Ristić, V., Stojanović, I. Evaluation of agricultural machinery using multi-criteria analysis methods. *Sustainability* – 2022. – v. 14 n.14, p. 8675.
8. Савчиц А. В., Шумячев В. М. Мониторинг качественных показателей абразивных материалов //Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2019. – 2019. – С. 74-78.
9. Кожус О.Г. Закономерности взаимодействия абразивной частицы с каналом фокусирующей трубы сопла гидроабразивной установки при введении ПАВ /Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Фроленкова Л.Ю., Петрухин А.В., Шлюпкин П.И//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2025, №2(370), С. 52-61.
10. Cappe' O., Moulines E., Ryde'n T. *Inference in Hidden Markov Models*/ Springer, 2005 – 652 p.
11. Неменко А.В. Оценки качества изделий с поверхностями второго порядка/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2025, №1(369), С. 16-23.
12. Неменко А.В. Прочностная надежность изделия в зависимости от особенностей финишной обработки /А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2022, №5(355), С. 144-149.
13. Неменко А.В. Прогноз трещиноустойчивости изделия после механической обработки /А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021, №4(348), С. 170-174.

Неменко Александра Васильевна

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровое проектирование»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +79788330519
E-mail: valesan@list.ru

Никитин Михаил Михайлович

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +79788150316
E-mail: MMNikitin@sevsu.ru

NEMENKO A.V., NIKITIN M.M.

RENEWAL OPTIMIZATION OF HYDRAULICS CYLINDER SURFACES OF TECHNICAL EQUIPMENT

Annotation. *Hydraulic cylinders of production units change their technical characteristics during operation due to wear of the contacting surfaces of the rod and guide cylinder. The abrasive that appears in this case damages the working surfaces of the hydraulic cylinder. To prevent the noted negative phenomena without completely replacing the hydraulic cylinder elements, they are periodically restored within the system of repair dimensions. The stochastic nature of the processes of both obtaining defects and restoring parts leads to a non-zero probability of irreversibly damaging the part by removing the entire allowance and not eliminating the defect. Reducing the probability of such a processing*

outcome is therefore an urgent task. The basis of the proposed method is to describe the process of a hydraulic cylinder rod restoring as a semi-Markov process with continuous time and discrete state space, which is subject to restrictions on the duration of individual processing phases, upon reaching which the cycle exits. For the practical application of the proposed approach, statistical data on the processing time distribution is required. Calculation formulas are obtained for the probabilities of successful and unsuccessful outcomes of restoring a hydraulic cylinder rod by grinding and polishing according to the criterion of maintaining the thickness of the part in combination with the absence of concentrated defects. Organizational recommendations are proposed to increase the yield of usable parts after processing and reduce the average processing time of one part.

Keywords: hydraulic cylinder, finishing, grinding, polishing, average processing time, probability of successful completion.

BIBLIOGRAPHY

1. Li, R., Zhang, Y., Feng, Z., Xu, J., Wu, X., Liu, M., ... & Yuan, W. Review of the progress of energy saving of hydraulic control systems. Processes, – 2023. v. 11 №12, p.3304.
2. Arola D., Williams C. L. Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces //International Journal of fatigue. – 2002. – v. 24. – №. 9. – p. 923-930.
3. Li, X., Zhao, Q., Tang, H., Yang, S., Lei, D., & Wang, X. Joint scheduling optimisation method for the machining and heat-treatment of hydraulic cylinders based on improved multi-objective migrating birds optimisation. Journal of Manufacturing Systems – 2024. – v.73, p. 170-191.
4. Skovorodin V. YA., Antipov A. V. Vliyanie finishnoj otdelochno-antifrikcionnoj obrabotki valov na amplitudnye parametry sherohovatosti poverhnosti //Nauchnoe obespechenie razvitiya APK v usloviyah importozameshcheniya. – 2018. – S. 387-391.
5. Goyal A., Singh H., Goyal R., Singh R, Singh S. Recent advancements in abrasive flow machining and abrasive materials: A review. Materials Today: Proceedings – 2022. v. 56, n.5. p. 3065-3072.
6. Safety of agricultural machinery and tractor maintenance planning with fuzzy logic and MCDM for agricultural productivity. International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences, v. 8 n.1, pp. 25-43.
7. Puška, A., Nedeljković, M., Šarkoćević, Ž., Golubović, Z., Ristić, V., Stojanović, I. Evaluation of agricultural machinery using multi-criteria analysis methods. Sustainability/ – 2022. – v. 14 n.14, p. 8675.
8. Savchic A. V., SHumyacher V. M. Monitoring kachestvennyh pokazatelej abrazivnyh materialov //Processy abrazivnoj obrabotki, abrazivnye instrumenty i materialy. SHlifabraziv-2019. – 2019. – S. 74-78. - 2024. - № 1(18). - S. 81-88.
9. Kozhus O.G. Zakonomernosti vzaimodejstviya abrazivnoj chastic s kanalom fokusiruyushchej trubki sopla gidroabrazivnoj ustanovki pri vvedenii PAV /Kozhus O.G., Barsukov G.V., Frolenkova L.YU., Petruhin A. V., SHlyupkin P.I//Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2025, №2(370), S. 52-61.
10. Cappe' O., Moulines E., Ryde'n T. Inference in Hidden Markov Models/ Springer, 2005 – 652 p.
11. Nemenko A.V. Ocenki kachestva izdelij s poverhnostyami vtorogo poryadka/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2025, №1(369), S. 16-23.
12. Nemenko A.V. Prochnostnaya nadezhnost' izdeliya v zavisimosti ot osobennostej finishnoj obrabotki /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2022, №5(355), S. 144-149.
13. Nemenko A.V. Prognoz treshchinoustojchivosti izdeliya posle mekhanicheskoy obrabotki /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2021, №4(348), S. 170-174.

Nemenko Aleksandra Vasilyevna

Federal State Autonomous Educational Foundation of Higher Education «Sevastopol State University», Sevastopol
Ph.D., docent of chair «Digital design»
299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33
Ph.: +79788330519
E-mail: valesan@list.ru

Nikitin Mikhail Mikhailovich

Federal State Autonomous Educational Foundation of Higher Education «Sevastopol State University», Sevastopol
Senior lecturer of chair «Higher Mathematics»
299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33
Ph.: +79788150316
E-mail: MMNikitin@sevsu.ru

© Неменко А.В., Никитин М.М., 2025

Адрес издателя:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95

Тел. (4862) 75-13-18

<http://oreluniver.ru>

E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, Орловская область, г. Орёл, ул. Московская, 34
+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fippt>

E-mail: radsu@rambler.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 09.12.2025 г.

Дата выхода в свет 19.12.2025 г.

Формат 70Х108/16. Усл. печ. л. 13,5

Цена свободная. Тираж 1000 экз.

Заказ № 293

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95