

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 редколлегий:

Альтенбах Хальм д-р техн. наук, проф. (Германия)
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)
Запонец Я. д-р техн. наук, проф. (Чехия)
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Кузачкин О.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Кухарь В.Д. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Лавриненко В.Ю. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Ли Шэнбо. канд. техн. наук, доц. (Китай)
Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Савин Л.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Сидоренко А.С. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Солдаткин В.М. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Хейфец 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: radstu@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
«Пресса России»
на сайтах www.ppressa-ru.ru и www.aks.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2026

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 технологии» как издание,
входящее в международную базу данных
Chemical Abstracts, приравняется к
изданиям категории K1.

Содержание

Теоретическая механика и ее приложения

Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Ромашин С.Н. Метод оценки поврежденности хрупких материалов без приложения внешних нагрузок.....	3
Сафина Г.Ф. Единственность диагностирования параметров жесткости шарнирно-упругих опор призматического стержня.....	10
Брылова Т.Б., Гриц Д.Б., Кондратенко Е.В., Фоменко В.К. Деформация котла вагона-цистерны.....	18

Машиностроительные технологии и оборудование

Карфидов А.О., Горбатюк С.М., Ибрагимова А.А. Сравнение установок для термодиффузионного цинкования.....	28
Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О. Вопросы контроля качества по стойкости против водородной хрупкости для бескислородной меди.....	36
Ляскин А.С., Ефремов А.В., Казмирук Д.А. Особенности преобразования традиционной рабочей конструкторской документации в электронную для изготовления деталей с применением аддитивных технологий.....	42
Неменко А.В., Никитин М.М., Мешков В.В. Обеспечение целостности при сверлении заготовок из полимерных материалов.....	53
Землянушинов Н.А., Землянушинова Н.Ю. Совершенствование способа упрочнения высоконагруженных конических и параболических пружин.....	58
Богущий В.Б., Шрон Л.Б. Расчет настроечных размеров при обработке деталей на станках-автоматах и автоматических линиях.....	66
Кудрявцев С.В. Моделирование тепловых процессов при совместном применении нанопокрывтий эпилама и СОТС на рабочую часть развертки.....	75
Образцов А.Е., Утенков В.М., Кузнецов П.М. Влияние ультразвуковых колебаний режущей кромки инструмента на качество обрабатываемой поверхности хрупких материалов.....	83
Сефедин И.Д., Ягьяев Э.Э. Повышение износостойкости металлорежущего инструмента на основе комплексного модифицирования его рабочей поверхности.....	95
Перевай Т.А., Мухина О.В., Тараховский А.Ю. Сравнительный анализ микротвердости защитных покрытий, полученных методами лазерной и сверхзвуковой газопорошковой наплавки.....	104
Неменко А.В., Никитин М.М. Управление технологическим процессом изготовления изделий с криволинейными поверхностями.....	110

Машиноведение и мехатроника

Спиринов М.С., Косарич М.Б., Нагорный В.А. Определение критериев оценки эффективности робототехнических комплексов военного назначения.....	116
Кудрявцев Р.А., Живанский И.Д., Елисеев Е.А., Блинов И.С., Воробьев П.С. Определение параметров и оценка их влияния на удельную мощность БДПТ.....	127
Грибанов Е.Н., Иванов Р.Е., Коростелев Д.А., Турбин Н.Е. Формирование пористого кремния для резистивных сенсоров в робототехнике: корреляция параметров морфологии поверхности и электрических свойств.....	135
Бондаренко М.Э., Родичев А.Ю., Яковленко О.В., Горин А.В. Моделирование процесса изнашивания радиальных подшипников скольжения с многослойными антифрикционными покрытиями.....	145
Нгуен Тхай Ха, Казаков Ю.Н., Савин Л.А. Проектировочный расчет радиально-упорных гидродинамических подшипников.....	152
Родичев А.Ю., Яковленко О.В., Васильев К.В. Сравнительный анализ методов исследования адгезии антифрикционных покрытий узлов трения.....	162

Приборы, биотехнические системы и технологии

Локтионова Ю.И., Жарких Е.В., Дрёмин В.В., Потапова Е.В., Крупаткин А.И., Дунаев А.В. Анализ микроциркуляции крови на билатеральных участках кожи с применением окклюзионной пробы.....	169
Жарких Е.В., Локтионова Ю.И., Янушин В.С., Косыкин А.В., Дунаев А.В. Анализ регионарных различий параметров микроциркуляторно-тканевых систем при разном положении тела испытуемого.....	176
Буркова Е.В., Бурков Д.В., Осабоча Л.И., Буркова С.Д. Снижение уровня загрязнения воздуха от котельных путем создания гелиотепловой станции на основе выработанных карьеров.....	185
Солдаткин В.М., Солдаткин В.В., Ефремова Е.С. Причины и модели параметров колебаний флюгерного чувствительного элемента датчика аэродинамических углов, обусловленных влиянием вихрей Кармана.....	192
Соболев Е.В. Математическая модель генерации синтетических данных косинусных круглосимметричных фотометрических тел.....	202

Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Пацовский А.П. Использование хроматографических технологий и спектрофотометрирования для исследования красящих пигментов цветков сафлора.....	212
Шербань П.С. Исследование физических процессов, влияющих на надежность и качество оборудования из полимерных армированных материалов.....	222
Карпов Д.Ф., Павлов М.В., Абрамова Е.В., Щипаков Н.А. Цифровые инструменты для контроля тепловой изоляции трубопроводов.....	236
Анцев А.В., Анцева Н.В., Каравачин Л.А., Янов Е.С. Оценка общей эффективности оборудования с использованием системы косвенного контроля технологического оборудования.....	248

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).

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:

Altenbach Holm Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)

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)

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)

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

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

Sidorenko A.S. Doc. Sc. Tech., Assist. Prof. (Russia)

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

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

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

Heifets M.L. 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/fipptt>

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-ru

and www.aks.ru

© Orel State University, 2026

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. Method for assessing damage in brittle materials in the absence of external loads.....	3
Safina G.F. Singularity of diagnostics of stiffness parameters of hinged elastic supports of prismatic rod.....	10
Brylova T.B., Grits D.B., Kondratenko E.V., Fomenko V.K. Deformation of the cistern carriage.....	18

Machine-building technologies and equipment

Karfidov A.O., Gorbatyuk S.M., Ibragimova A.A. Comparison of thermal diffusion galvanizing plants from different manufacturers.....	28
Golenkov V.A., Radchenko S.Y., Dorohov D.O. Quality control issues for hydrogen fragility resistance in oxygen-free copper.....	36
Lyaskin A.S., Efremov A.V., Kazmiruk D.A. Details of transformation of traditional manufacturing design documents into electronic form for additive manufacturing.....	42
Nemenko A.V., Nikitin M.M., Meshkov V.V. Predictive estimates of temperature when drilling holes in polymeric products.....	53
Zemlyanushnov N.A., Zemlyanushnova N.Y. Improvement the hardening method for highly loaded conical and paraboloid springs.....	58
Bogutsky V.B., Shron L.B. Calculation of adjustment dimensions when processing parts on automatic machines and automatic lines.....	66
Kudryavtsev S.V. Modeling of thermal processes in the couple application of epilam nanoprotective coatings and cutting oil on the working part of the reamer.....	75
Obraztsov A.E., Utenkov V.M., Kuznetsov P.M. The effect of ultrasonic vibrations of the cutting edge of the tool on the quality of the treated surface of brittle materials.....	83
Sefedin I.D., Yagyaev E.E. Improving the wear resistance of metal-cutting tools based on comprehensive modification of their working surface.....	95
Perevay T.A., Mukhina O.V., Tarakhovsky A.Yu. Comparative analysis of the microhardness of protective coatings obtained by subsonic and supersonic gas-powder surface-building methods.....	104
Nemenko A.V., Nikitin M.M. Control of technological process while manufacturing of products with second order surfaces.....	110

Machine Science and Mechatronics

Spirin M.S., Kosarich M.B., Nagorny V.A. Determination of criteria for evaluating the effectiveness of military-grade robotic systems.....	116
Kudryavtsev R.A., Zhivansky I.D., Eliseichev E.A., Blinov I.S., Vorobyov P.S. Determination of parameters and assessment of their influence on the specific power of dc bluetooth motors.....	127
Gribanov E.N., Ivanov R.E., Korostelev D.A., Turbin N.E. Formation of porous silicon for resistive sensors in robotics: correlation of surface morphology and electrical properties. Bondarenko M.E., Rodichev A.Yu., Yakovlenko O.V., Gorin A.V. Modeling the wear process of radial plain bearings with multilayer anti-friction coatings.....	135
Nguyen Thai Ha, Kazakov Yu.N., Savin L.A. Design calculation of radial-axial hydrodynamic bearings. Rodichev A.Yu., Yakovlenko O.V., Vasiliev K.V. Comparative analysis of methods for studying adhesion of antifriction coatings of friction units.....	145
	152
	162

Devices, biotechnical systems and technologies

Loktionova Yu.I., Zharkikh E.V., Dremine V.V., Potapova E.V., Krupatkin A.I., Dunaev A.V. Analysis of microcirculation of blood in bilateral skin areas using an occlusion test.....	169
Zharkikh E.V., Loktionova Yu.I., Yanushin V.S., Koskin A.V., Dunaev A.V. Analysis of regional differences in parameters of microcirculatory-tissue systems in different body positions of the subject.....	176
Burkova E.V., Burkova D.V., Osadchaya L.I., Burkova S.D. Reducing air pollution from boiler stoves by creating a solar heat station based on exhausted quarries.....	185
Soldatkin V.M., Soldatkin V.V., Efremova E.S. Reasons and models of oscillation parameters of the fluger sensitive element of the aerodynamic angle sensor due to the influence of the vortex pole.....	192
Sobolev E.V. Mathematical model for generating synthetic data of cosine rotationally symmetrical photometric bodies.....	202

Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

Patsovskiy A.P. Using chromatographic technologies and spectrophotometry to study coloring pigments of safflowers.....	212
Shcherban P.S. Research of physical processes affecting the reliability and quality of equipment made of polymer reinforced materials.....	222
Karpov D.F., Pavlov M.V., Abramova E.V., Shchipakov N.A. Digital tools for pipeline thermal insulation monitoring.....	236
Antsev A.V., Antseva N.V., Karavdin L.A., Yanov E.S. Assessment of overall equipment effectiveness using indirect control system of technological equipment.....	248

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

УДК 531.01

DOI: 10.33979/2073-7408-2026-376-2-3-9

ШОРКИН В.С., ФРОЛЕНКОВА Л.Ю., РОМАШИН С.Н.

**МЕТОД ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ
БЕЗ ПРИЛОЖЕНИЯ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК**

Аннотация. Предложен метод оценки поврежденности хрупкого материала, которая существует в нем в отсутствии внешних воздействий из-за внутренних межмолекулярных сил. Эти силы порождают парные и тройные межчастичные нелокальные силы притяжения. Это обстоятельство использовано для отказа от гипотезы о том, что в отсчетном состоянии ненагруженный материал не содержит внутренних напряжений. В работе показано, что при наличии таких напряжений материалу энергетически выгодно нарушение его сплошности. Показан способ учета этих сил при оценке поврежденности материала для случая, когда расстояния между порождающими ее микротрещинами велики по сравнению с их размерами.

Ключевые слова: хрупкий материал, микротрещина, поврежденность, нелокальное многочастичное взаимодействие, начальное напряженное состояние.

Введение

Теоретическая прочность твердых тел существенно превосходит их реальную прочность из-за того, что в любом реальном теле содержится много микротрещин [1, 2]. Эти микротрещины в сплошном материале могут развиваться из появившихся по разным причинам дефектов его атомной структуры. Обычно предполагается, что эти причины связаны с несовершенством технологии изготовления материала, предыдущей термо-механической обработкой, другими обстоятельствами, не связанными с физической природой самого материала. При наличии микротрещин хрупкий материал разрушается (в соответствии с представлениями [1, 2, 3]) из-за потери ими устойчивости под влиянием внешних воздействий.

Описание хрупкого разрушения [4] опирается на предложенную в работах Ю.Н. Работнова и Л.М. Качанова идею существования дополнительной к используемым в механике деформируемого твердого тела характеристики – рассеянной поврежденности материала (микропор, микротрещин). Для ее описания используется дифференциальное уравнение, описывающее скорость ее развития в зависимости от внутреннего напряженно-деформированного состояния материала. При его решении обычно принимается (например, [5, 6]), что до приложения внешней нагрузки материал бездефектен и его поврежденность равна нулю.

В данной работе показано, что даже в отсутствии внешней нагрузки в хрупком материале существует отличная от нуля поврежденность, которая появляется из-за начального напряженного состояния материала, вызванного нелокальными потенциальными взаимодействиями его частиц. Теория, описывающая такие взаимодействия, представлена в работах [7, 8]. Она опирается на то, что между конденсированными фазами проявляются силы притяжения или отталкивания, радиус действия которых на много превосходит длину химических связей. Причиной их возникновения являются высокочастотные флуктуационные электромагнитные поля, связанные с движением электронов в атомах и молекулах [9]. Известно, что высокочастотные электромагнитные поля могут приводить не только к механическому, но и тепловому воздействию на конденсированные среды [10]. Модель такого воздействия рассмотрена в работе [11].

1 Оценка поврежденности хрупкого материала.

Рассматривается тело B , размеры которого на много превосходят размеры содержащихся в нем трещин. Так что его можно считать бесконечно большим. Предполагается, что тело B , состоящее из хрупкого материала, содержит сеть микротрещин, которые возникли в нем по разным причинам. Ввиду этого оно является «дискретно-непрерывной» средой. Размеры микротрещин считаются известными. С помощью информации о размерах микротрещин можно построить континуум K , для которого одной из функций состояния является непрерывная и дифференцируемая скалярная функция места и времени $\omega_K(\vec{r}, t)$, характеризующая его поврежденность.

Считается, что тело B занимает область Λ , континуум $\mathbf{K}$ – область Λ_K . Предполагается, что для каждой элементарной частице dK области Λ_K с центром в точке $\vec{r}$ существует представительная (репрезентативная) частица ΔB «дискретно-непрерывной» среды B , занимающая область $\Delta \Lambda$ с объемом ΔV и центром инерции в точке $\vec{r}$, в котором все свойства представлены усредненными переменными. Тогда значение ω_K определяется выражением:

$$(\Delta B \rightarrow d B) \Rightarrow (\omega \rightarrow \omega_K). \quad (1)$$

Каждая представительная частица содержит внутри себя единственную трещину $\mathfrak{Z}$, ее поверхностный слой ΔB_A , в котором сосредоточена поверхностная энергия берегов трещины, и не возмущенную присутствием трещины часть ΔB_9 , см. рисунок, где 1 – область Λ_3 , занятая трещиной (материал в ней отсутствует); 2 – область $\Delta \Lambda_A$ (площадь боковой поверхности S_A), занятая поверхностным слоем трещины ΔB_A , в котором напряженно-деформированное состояние возмущено трещиной (имеет толщину h_{eff} области Λ_3 ; 3 – область $\Delta \Lambda_9$, занятая той частью ΔB_9 материала частицы ΔB , которая не возмущена присутствием в ней трещины. Эти объекты занимают соответственно области $\Delta \Lambda_3$, $\Delta \Lambda_A$, $\Delta \Lambda_B$ с объемами ΔV_3 , ΔV_A , ΔV_B . Так что выполняются следующие равенства:

$$\Delta \Lambda = \Delta \Lambda_3 \cup \Delta \Lambda_A \cup \Delta \Lambda_9, \Delta B_\omega = \Delta B_9 \cup \Delta B_A, \Delta V = \Delta V_3 + \Delta V_A + \Delta V_9. \quad (2)$$

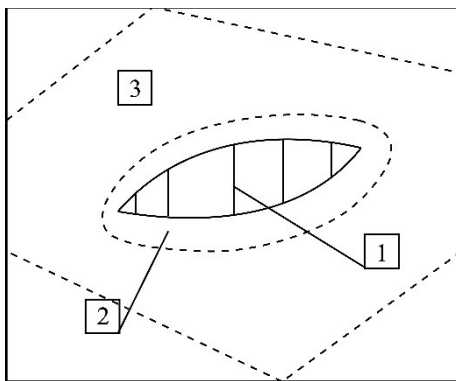


Рисунок 1 – Структура области, занимаемой произвольной частицей ΔB

Поврежденностью ω представительной частицы ΔB предлагается считать отношение

$$\omega = \frac{\Delta V_3}{\Delta V}. \quad (3)$$

«Целостностью» ϑ той же частицы считается отношение

$$\vartheta = \frac{\Delta V_9 + \Delta V_A}{\Delta V}. \quad (4)$$

Введенные величины обладают очевидным свойством:

$$\omega + \vartheta = 1. \quad (5)$$

Потенциальная энергия ΔW частицы ΔB после образования в ней трещины в стационарном состоянии складывается из энергии ΔW_9 невозбужденной части ΔB_9 , и энергии $W_s S_A$ (W_s – поверхностная энергия) возбужденных появлением свободной границы – берегов трещины площадью поверхности S_A (или длиной L_A – для плоской трещины).

$$\Delta W = w_9 \Delta V_9 + W_s S_A. \quad (6)$$

В основу расчета величин w_9 и W_s положена модель трещины Баренблатта [3], напряженно-деформированное состояние материала вокруг которой, а также взаимодействие ее берегов описаны с помощью нелокальной модели упругого материала, предложенной в работах [7, 8]. Модель Баренблатта предполагает наличие смыкания берегов трещины в хрупком материале под острыми углами, что адекватно их реальному виду. В то же время результатом расчета напряженно-деформированного состояния материала в окрестностях углов (для плоских трещин) и линий (для трехмерных трещин) на основании классической

теории упругости является появление в этих областях бесконечно больших напряжений, деформаций и объемных плотностей их энергии. В таком случае построить континуум $\mathbf{K}$, для которого одной из функций состояния является непрерывная и дифференцируемая скалярная функция места и времени $\omega_{\mathbf{K}}(\vec{r}, t)$, характеризующая его поврежденность, нельзя из-за возникновения бесконечных значений этой функции при использовании для ее построения равенства (6).

В работе рассматривается частный случай, в котором предполагается, что микротрещины расположены далеко друг от друга. Их размеры малы по сравнению с расстоянием между ними, а объем материала поверхностного слоя ΔV_A на много меньше объема трещины ΔV_{Σ} – поверхностный слой трещин очень тонкий.

$$\frac{\Delta V_A}{\Delta V_{\Sigma}} \ll 1. \quad (7)$$

Далее предлагаются приближенные методы оценки поврежденности хрупких (без остаточных деформаций после образования трещин) материалов.

Слагаемое $W_s S_A$ характеризует фактически энергию частицы ΔB^* . Занимаемая ей область является объединением области, занятой трещиной и области, занятой поверхностным слоем. Ее объем $\Delta V^* = \Delta V_{\Sigma} + \Delta V_A$, а внутренность занята трещиной, то есть пуста, вся масса распределена по поверхностному слою. Предлагается вместо этой частицы рассматривать ту же частица, но с равномерно распределенной по области $\Delta \Lambda_{\Sigma} \cup \Delta \Lambda_A = \Delta \Lambda^*$ с объемом $\Delta V_{\Sigma} + \Delta V_A = \Delta V^*$ объемной плотностью энергии w^* . Так что выполняется равенство

$$(\Delta W^* = W_s S_A \equiv w^* \Delta V^* \approx w^* \Delta V_{\Sigma}) \Rightarrow \Delta W = \Delta W_g + \Delta W_{\omega} \approx w_g \Delta V_g + w_{\omega} \Delta V_{\Sigma}. \quad (8)$$

После этого можно записать:

$$w = \omega w_{\omega} + \vartheta w_g = \omega w_{\omega} + (1 - \omega) w_g. \quad (9)$$

В этом выражении величины w_{ω} и w_g зависят от поврежденности ω . Далее предлагается определение этих зависимостей.

Плотность w_g распределения выражением [7]:

$$w_g = \int_{\Lambda_g} \Phi^{(2)} d(\Delta V'_g) + \int_{\Lambda_g} d(\Delta V''_g) \int_{\Lambda_g} \Phi^{(2)} d(\Delta V'_g). \quad (10)$$

Здесь $\Phi^{(2)} = \Phi^{(2)}(L')$ – приходящаяся на единицы объемов $d(\Delta V_g)$ и $d(\Delta V'_g)$ двух частиц, находящихся на расстоянии L' , потенциальная энергия их взаимодействия; $\Phi^{(3)} = \Phi^{(3)}(L', L'')$ – аналогичная энергия взаимодействия трех частиц с объемами $d(\Delta V_g)$, $d(\Delta V'_g)$ и $d(\Delta V''_g)$.

Сделав замену $\Delta V_g = \vartheta \Delta V$, можно получить связь w_g с парным и тройным потенциалами, которую необходимо использовать при определении связи средней по области $\Delta \Lambda$ плотности потенциальной энергии с помощью выражения (9). При вычислении интегралов область интегрирования необходимо считать бесконечно протяженной: $\Lambda_g \rightarrow \infty$. Это делается с учетом того, что в область Λ_g попадают все материальные частицы ΔB среды, которые образовывали бесконечно большое тело B . Связь w_g с парным и тройным потенциалами связь w_g с парным и тройным потенциалами приобретает следующий вид:

$$w_g = \vartheta \int_{\infty} \Phi^{(2)} d(\Delta V) + \vartheta^2 \int_{\infty} d(\Delta V) \int_{\infty} \Phi^{(3)} d(\Delta V) = \vartheta D^{(2)} + \vartheta^2 D^{(3)}. \quad (11)$$

Здесь $D^{(2)} = \int_{\infty} \Phi^{(2)} d(\Delta V)$, $D^{(3)} = \int_{\infty} d(\Delta V) \int_{\infty} \Phi^{(3)} d(\Delta V)$ – потенциальная энергия парных и тройных взаимодействий частиц dB , расположенных в единице объема тела B со всеми другими его частицами.

Плотность w_{ω} распределения выражением:

$$w_{\omega} = W_s \frac{S_A}{\Delta V}. \quad (12)$$

В этом выражении

$$W_s S_A = \int_{\Delta \Lambda^*} [w_\infty - \Delta w] d(\Delta V^*). \quad (13)$$

Здесь интегрируемая функция является кусочно-непрерывной. Внутри области $\Delta \Lambda_{\Sigma}$ она равна нулю, на границе областей $\Delta \Lambda_A$ и $\Delta \Lambda_{\Sigma}$ она скачком изменяется от нуля до половины объемной плотности w_∞ потенциальной энергии в невозмущенной части тела B , а затем уменьшается, стремясь к нулю.

Сделав в выражении (13) замену $d(\Delta V^*) = \omega d(\Delta V)$ можно получить учитывающее примерное равенство $\Delta V^* \approx \Delta V_{\Sigma}$ окончательное выражение для w_ω :

$$w_\omega = \frac{\omega}{\Delta V_{\Sigma}} \int_{\Delta \Lambda^*} [w_\infty - \Delta w] d(\Delta V) = D_{\Sigma} \omega. \quad (14)$$

Конкретный вид зависимости Δw от расстояния h от границы пограничного слоя строится на основании работы [7].

После этого выражение (10) можно представить в виде:

$$w = \omega w_\omega + (1 - \omega) w_g = \omega^2 D_{\Sigma} + (1 - \omega)^2 D^{(2)} + (1 - \omega)^3 D^{(3)}. \quad (15)$$

Для тех материалов, у которых влияние тройных взаимодействий их частиц на внутреннюю потенциальную энергию мало по сравнению с влиянием на нее парных взаимодействий, последним слагаемым в выражении (15) можно пренебречь. Тогда эта зависимость получает вид имеющей минимум параболы. Значение поврежденности в точке минимума равно:

$$\omega_{\min} = \frac{1}{1 + (D_{\Sigma} / D^{(2)})}. \quad (16)$$

Обязательным условием, которому должна удовлетворять поврежденность в силу своего определения, является неравенство

$$0 < \omega_{\min} < 1. \quad (17)$$

Неравенство справедливо, так как $D^{(2)} = \int_{\infty}^{\infty} \Phi^{(2)} d(\Delta V_g) > 0$ – из-за устойчивости системы частиц dB_g , составляющих ΔB_g [12], $D_{\Sigma} > 0$ в силу положительности подынтегральной функции, определяющем D_{Σ} выражении (14). Если $D^{(2)} = 0$, то $\omega_{\min} = 1$. Это возможно, когда занимаемая материальной частью ΔB_g область $\Delta \Lambda_g$ – пустое множество. Если $D_{\Sigma} = 0$, то в частице ΔB нет областей, где $w_\infty - \Delta w(h) > 0$, $(h \rightarrow \infty) \Rightarrow (w_\infty > \Delta w(h) \rightarrow 0)$ (нет пограничных слоев), то $\omega_{\min} = 0$. Это является свидетельством отсутствия в материале трещин.

Пример расчета поврежденности

Для примера использован кремний. В качестве его исходных характеристик механических свойств использованы параметры Ламе $\lambda = 74 \cdot 10^{-9} \text{ Н/м}^2$, $\mu = 63 \cdot 10^{-9} \text{ Н/м}^2$ и модуль Юнга $E = 160 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$ [13].

Величина поврежденности, вызванной внутренними естественными напряжениями, вычислена на основании формулы (16). Используемые для этого коэффициенты пропорциональности $\Phi^{(2)}$ и $\Phi^{(3)}$ межчастичных потенциалов определены равенствами

$$\Phi^{(2)} = \Phi_0^{(2)} \varphi^{(2)}(\beta L_{12}), \quad \Phi^{(3)} = \Phi_0^{(3)} \phi^{(2)}(\beta L_{12}) \phi^{(2)}(\beta L_{13}). \quad (18)$$

Здесь $\Phi_0^{(2)}$, $\Phi_0^{(3)}$ и β – материальные параметры, значения которых определяются через параметры Ламе, методами, которые изложены в работах [12, 14]. Формулы для их вычисления имеют следующий вид:

$$\left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) = \frac{4\mu + 45\lambda}{294\pi} = \frac{E}{294\pi} \frac{2 + 41\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad (19)$$

$$\left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right) = \frac{27(\lambda - \mu)}{1764\pi^2} = \frac{27E}{1764\pi^2} \frac{4\nu - 1}{2(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad (20)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \sqrt{3\pi \left(\frac{f_0}{f_1} \right) \frac{15 \left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) + \left(\frac{1563\pi}{4} \right) \left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right)}{2\mu + \lambda}}. \quad (21)$$

В выражении (21) f_0 и f_1 – экспериментально определяемые параметры, характеризующие аппроксимацию дисперсионного закона функцией $\omega^2 = f(K^2) = f_0 K^2 - f_1 K^4$, в которой ω и K соответственно круговая частота и волновое число. Новым, по отношению к λ и μ является только параметр f_1 , так как f_0 выражается через классические характеристики линейного упругого состояния [7].

В случае использования теоретического дисперсионного закона:

$$\beta = \frac{3\sqrt{\pi}}{l_{at}} \sqrt{\frac{15 \left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) + \left(\frac{1563\pi}{4} \right) \left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right)}{2\mu + \lambda}}. \quad (22)$$

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

Безразмерные функции $\varphi^{(2)}(\beta L_{12})$ и $\varphi^{(2)}(\beta L_{13})$ характеризуют зависимость от расстояния L_{12} и L_{13} потенциального взаимодействия частицы dB_9 с частицами dB_{92} и dB_{93} . В обоих случаях эти функции определены следующими равенствами [15]:

$$\varphi^{(2)}(\xi) = \begin{cases} \varphi_1(\xi), & 0 \leq \xi = \beta l \leq \xi_0 \rightarrow 0 \\ \varphi_2(\xi) = e^{-2(\xi - \xi_0)} - 2e^{-(\xi - \xi_0)} & \xi_0 < \xi < \infty; \end{cases} \quad (23)$$

Вид функции $\varphi_1(\xi)$, $0 \leq \xi = \beta l \leq \xi_0 \rightarrow 0$, обоснован в работе [7].

С помощью такого представления межчастичного потенциала вычислены значения параметров $\Phi_0^{(2)}$, $\Phi_0^{(3)}$ и β , а также поверхностной энергии W_s и приводящего к появлению микротрещин растягивающего напряжения p [8]:

$$\Phi_0^{(2)} = 0,08 \cdot 10^{40} \text{ Дж} / \text{м}^6, \quad \Phi_0^{(3)} = 0,0006 \cdot 10^{60} \text{ Дж} / \text{м}^9, \quad \beta = 0,65 \cdot 10^{10} \text{ Н} / \text{м}^2, \\ p = 6,2 \cdot 10^{10} \text{ Н} / \text{м}^2, \quad W_s = 1,28 \text{ Дж} / \text{м}^2. \quad (24)$$

Величина характерного размера микротрещины l определена на основании представленной в работе [3] приближенной оценки длины устойчивой трещины, построенной без учета существования микротрещин, значит с теоретическим модулем Юнга $E_0 \approx 500E$:

$$l \approx \frac{W_s E_0}{p^2}. \quad (25)$$

Величина l оказалась равной $l \approx 30 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 30 \text{ нм}$. При раскрытии микротрещины $u \approx 10^{-10} \text{ м}$ объем области $\mathfrak{Z}$ с таким диаметром равен $\Delta V_{\mathfrak{Z}} \approx 36 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3$, а площадь боковой поверхности: $S_A \approx l^2 = 10^{-15} \text{ м}^2$.

Для вычисления констант $D^{(2)}$ и $D_{\mathfrak{Z}}$, входящих в выражение (15), использованы значения

$$\left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) = 2,8 \cdot 10^9 \text{ Дж} / \text{м}^3, \quad \left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right) = 0,02 \cdot 10^9 \text{ Дж} / \text{м}^3. \quad (26)$$

Получено: $D^{(2)} \approx 14 \cdot 10^9 \text{ Дж} / \text{м}^2$, $D_{\mathfrak{Z}} \approx 10^{13} \text{ Дж} / \text{м}^2$. Для этих значений поврежденность оказалась равной $\omega_{\min} \approx 10^{-4}$. Очевидно, что этот результат нельзя считать точным, однако,

отличие его от нуля дает основание считать, что начальная поврежденность материала энергетически выгодна для него.

Заключение

Основным теоретическим результатом данной работы является то, что в рамках механики сплошных хрупких материалов оказалось возможным обоснование того факта, что в сплошном материале оказалось энергетически выгодным наличие нарушения его сплошности под влиянием внутренних межчастичных взаимодействий, которые существуют в нем вследствие устойчивости его твердого состояния из-за взаимного межмолекулярного притяжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения / Ю.Н. Работнов. – Москва: Наука, 1987. 80 с.
2. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // Philosophical Transactions of the royal society of London. – 1921. – Series A. 221 (2). – P. 163 – 198. Doi.org/10.1098/rsta.1921.0006.
3. Raiser Yu.P. Physical principles of the theory of brittle fracture cracks / P.S. Volegov, D.S. Gribov, P.V. Trusov // Soviet Physics Uspekhi. – 1970. – V. 13 (1). – P. 129 – 139. Doi: 10.1070/PU1970v013n01ABEH004201.
4. Volegov P.S. Damage and fracture: classical continuum theories / P.S. Volegov // Physical Mesomechanics. – 2017. – V. 20(2). – P. 157 – 173. Doi: 10.1134/S1029959917020060.
5. Erofeyev V.I. Elastic wave propagation in damaged materials and construction elements / V.I. Erofeyev, S.A. Monichev // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 2000. – V. 11 (1 – 3). – P. 31 – 36. Doi:10.1515/JMBM.2000.11.1-3.31.
6. Kashtanov A.V. Energy approach to determination of the instantaneous damage level / A.V. Kashtanov, Yu.V. Petrov // Technical Physics. – 2006. – V. 51 (5). – P. 604 – 608. Doi:10.1134/S1063784206050100.
7. Shorkin V.S. Linear theory of micropolar media with internal nonlocal potential interactions / V.S. Shorkin, E.N. Vilchevskaya, H. Altenbach // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. – 2023. – V. 103 (11): e202300099. Doi: 10.1002/zamm.202300099.
8. Frolenkova L.Yu. Surface energy and adhesion energy of elastic bodies / L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin // Mechanics of solids. – 2017. – V. 52 (1). – P. 62 – 74. Doi: 10.3103/S0025654417010083.
9. Чураев Н.В. Поверхностные силы и физикохимия поверхностных явлений / Н.В. Чураев // Успехи химии. – 2024. – В. 73 (1). – С. 26 – 38.
10. Дедков Г.В. Флуктуационно-электромагнитное взаимодействие движущихся тел / Г.В. Дедков, А.А. Кясов // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование. – 2009. – Т. 1. – № 2. – С. 5 – 58.
11. Shorkin V. A model of thermo-electric-elastic dielectric under microwave irradiation / V. Shorkin, Holm Altenbach, E. Vilchevskaya, S. Romashin // Nanoscience and Technology: An International Journal. January 2025. DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2025059339
12. Presnetsova V.Yu., Romashin S.N., Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S., Yakushina S.I. A variant of the description of the 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. – V. 9 (4). – P. 299 – 323. Doi: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2018026714.
13. Свойства элементов / Т. В. Андреев и др.; Под ред. Г. В. Самсонова. Ч. 1: Физические свойства. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1976. – 599 с.
14. Ромашин С.Н. Применение метода групповых разложений для нелокальной модели упругой среды / С.Н. Ромашин, М.В. Хорошилова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 2 (334). – С. 9 – 13.
15. Romashin S.N. Variant of the relationship between the mechanical and adhesive properties of solid materials / S.N. Romashin, V.S. Shorkin // Mechanics of solids. – 2020. – V. 55 (8). – P. 1392 – 1405. <https://link.springer.com/article/10.3103/S0025654420080233>.

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
индустриального
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

SHORKIN V.S., FROLENKOVA L.Yu., ROMASHIN S.N.

METHOD FOR ASSESSING DAMAGE IN BRITTLE MATERIALS IN THE ABSENCE OF EXTERNAL LOADS

Abstract. A method is proposed for determining the damage in a brittle material that exists within it in the absence of external forces, due to internal intermolecular forces. These forces generate pairwise and triple nonlocal interparticle attractive forces. This fact is used to reject the hypothesis that, in the reference state, an unloaded material contains no internal stresses. It is demonstrated in the paper that, in the presence of such stresses, it is energetically favorable for the material to experience a loss of continuity. A method is presented for accounting for these forces when evaluating material damage, specifically for cases in which the distances between microcracks generating the damage are large compared to their sizes.

Keywords: brittle material, microcrack, damage, nonlocal multiparticle interaction, initial stress state.

BIBLIOGRAPHY

1. Rabotnov Yu.N. Vvedenie v mehaniku razrusheniya / Yu.N. Rabotnov. – Moskva: Nauka, 1987. 80 s.
2. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // Philosophical Transactions of the royal society of London. – 1921. – Series A. 221 (2). – P. 163 – 198. Doi.org/10.1098/rsta.1921.0006.
3. Raiser Yu.P. Physical principles of the theory of brittle fracture cracks / P.S. Volegov, D.S. Gribov, P.V. Trusov // Soviet Physics Uspekhi. – 1970. – V. 13 (1). – P. 129 – 139. Doi: 10.1070/PU1970v013n01ABEH004201.
4. Volegov P.S. Damage and fracture: classical continuum theories / P.S. Volegov // Physical Mesomechanics. – 2017. – V. 20(2). – P. 157 – 173. Doi: 10.1134/S1029959917020060.
5. Erofeyev V.I. Elastic wave propagation in damaged materials and construction elements / V.I. Erofeyev, S.A. Monichev // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 2000. – V. 11 (1 – 3). – P. 31 – 36. Doi:10.1515/JMBM.2000.11.1-3.31.
6. Kashtanov A.V. Energy approach to determination of the instantaneous damage level / A.V. Kashtanov, Yu.V. // Petrov Technical Physics. – 2006. – V. 51 (5). – P. 604 – 608. Doi:10.1134/S1063784206050100.
7. Shorkin V.S. Linear theory of micropolar media with internal nonlocal potential interactions / V.S. Shorkin, E.N. Vilchevskaya, H. Altenbach // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. – 2023. – V. 103 (11): e202300099. Doi: 10.1002/zamm.202300099.
8. Frolenkova L.Yu. Surface energy and adhesion energy of elastic bodies / L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin // Mechanics of solids. – 2017. – V. 52 (1). – P. 62 – 74. Doi: 10.3103/S0025654417010083.
9. Churaev N.V. Poverhnostnye sily i fizikohimiya poverhnostnyh yavlenij / N.V. CHuraev // Uspekhi himii. – 2024. – V. 73 (1). – S. 26 – 38.
10. Dedkov G.V. Fluktuacionno-elektromagnitnoe vzaimodejstvie dvizhushchihya tel / G.V. Dedkov, A.A. Kyasov // Nanostruktury. Matematicheskaya fizika i modelirovanie. – 2009. – T. 1. – № 2. – S. 5 – 58.
11. Shorkin V. A model of termo-electric-elastic dielectric under microwave irradiation / V. Shorkin, Holm Altenbach, E. Vilchevskaya, S. Romashin // Nanoscience and Technology: An International Journal. January 2025. DOI: 10.1615/NanosciTechnolIntJ.2025059339
12. Presnetsova V.Yu., Romashin S.N., Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S., Yakushina S.I. A variant of the description of the 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. – V. 9 (4). – P. 299 – 323. Doi: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2018026714.
13. Svoystva elementov / T. V. Andreev i dr.; Pod red. G. V. Samsonova. Ch. 1: Fizicheskie svoystva. 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Metallurgiya, 1976. – 599 s.
14. Romashin S.N. Primenenie metoda gruppovyh razlozhenij dlya nelokalnoj modeli uprugoj sredy / S.N. Romashin, M.V. Horoshilova // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii. – 2019. – № 2 (334). – S. 9 – 13.
15. Romashin S.N. Variant of the relationship between the mechanical and adhesive properties of solid materials / S.N. Romashin, V.S. Shorkin // Mechanics of solids. – 2020. – V. 55 (8). – P. 1392 – 1405. https://link.springer.com/article/10.3103/S0025654420080233.

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

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

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

САФИНА Г.Ф.

ЕДИНСТВЕННОСТЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖЕСТКОСТИ ШАРНИРНО-УПРУГИХ ОПОР ПРИЗМАТИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ

Аннотация: В работе рассмотрена задача диагностирования коэффициентов жесткостей шарнирно-упругих опор призматического стержня по известным значениям частот его поперечных колебаний. Граничная задача сформулирована математически таким образом, что позволяет определять не только упругие опоры, но и абсолютно жесткие крепления опор стержня. Исследованы условия и доказана теорема о существовании и единственности решения задачи. Для этого вместе с граничной задачей рассмотрена другая задача с тем же уравнением, но с отличными от первоначальных коэффициентов граничных условий. Дан алгоритм диагностирования искомых параметров жесткости опор призматического стержня, позволяющий при известных трех значениях частот его поперечных колебаний найти решение системы из трех алгебраических уравнений с четырьмя неизвестными. По представленному алгоритму решения приведены численные расчеты искомых параметров жесткости с применением пакета Maple, подтверждающие единственность диагностирования, а также возможность установления и абсолютно жестких креплений стержня.

Ключевые слова: призматический стержень, граничная задача, вековое уравнение, частоты колебаний, коэффициенты жесткостей, диагностирование, алгоритм решения.

Введение

Исследованная в работе задача по диагностированию параметров жесткости по акустическому отклику свободных колебаний призматического стержня продолжает исследования в области неразрушающего контроля различных механических систем, содержащих подобные составляющие: балки, стержни, диски, валы, роторы и т.д. [1-3].

В настоящее время задачи моделирования и диагностирования, использующие известные спектры частот колебаний механизмов и их частей, играют основную и необходимую роль почти во всех жизненных циклах эксплуатации механизмов, комплексной оценке их состояния, а также в решениях проективных, прогностических задач. Технологии и алгоритмы, применяемые при решении таких задач, позволяют решать многие производственные задачи, связанные с колебаниями, без применения дорогостоящих разборок узлов механизмов, без трудоемких физических и технологических работ по установлению износа, дефектов, целостности, надежности и т.д. оборудования [4-9].

Задачи диагностики (так называемые обратные задачи) тесно связаны с исследованиями, проводимыми по прямым спектральным задачам, в которых не только рассматривается поиск частот колебаний, но и исследуются влияние на частотный спектр различных физических и геометрических характеристик частей механизмов, а также условий их креплений.

Подобная прямая спектральная задача по свободным и вынужденным колебаниям стержней, в том числе призматических, рассмотрена во многих трудах по теории колебаний, например, в [4], [7], [10]. В работе [11] поставлена обратная спектральная задача для призматического стержня и приведен метод двойственного восстановления параметров жесткости шарнирных опор стержня.

Данное исследование решает обратную задачу другим методом, позволяющим по трем частотам поперечных колебаний призматического стержня диагностировать коэффициенты жесткостей его шарнирно-упругих опор единственным образом. Формулируется соответствующая математическая постановка задачи диагностирования, доказываемая единственность ее решения, приводятся численные расчеты по алгоритму с использованием пакета Maple, подтверждающие сформулированные аналитические выводы. Предложенный алгоритм позволяет определять также не только упругие опоры с соответствующими параметрами жесткости, но и возможные абсолютно жесткие крепления опор стержня.

Постановка задачи диагностирования

Задача по свободным поперечным колебаниям призматического стержня на шарнирно-упругих опорах сводится к граничной задаче с дифференциальным уравнением [4], [5], [11]:

$$\frac{\partial^4 z}{\partial y^4} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \eta_0 z = 0 \quad (1)$$

и краевыми условиями:

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)_{y=0} = 0; & EI \left(\frac{\partial^3 z}{\partial y^3} \right)_{y=0} - c_1 z_{y=0} = 0; \\ \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)_{y=l} = 0; & EI \left(\frac{\partial^3 z}{\partial y^3} \right)_{y=l} + c_2 z_{y=l} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В уравнении (1): $z = z(y)$ – поперечный прогиб (перемещение) от обобщенной осевой координаты y ; коэффициенты уравнения выражаются через физические параметры стержня в виде $a = \sqrt{\frac{EI}{\rho S}}$, $\eta_0 = \frac{C_0}{EI}$, где E , I и S – модуль упругости, момент инерции и площадь прямоугольного поперечного сечения; C_0 и ρ – коэффициент жесткости и плотность материала стержня, l – длина участка стержня между его шарнирными опорами.

В условиях (2): c_1 и c_2 – коэффициенты жесткостей левой и правой, соответственно, шарнирно-упругих опор стержня. Схематическая модель участка призматического стержня на шарнирно-упругих опорах показана на рисунке 1.

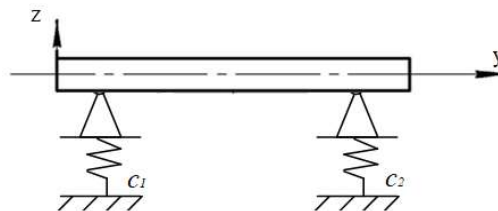


Рисунок 1 – Призматический стержень на шарнирно-упругих опорах

С учетом малых свободных колебаний стержня решение (1) ищем в виде

$$z = A_1 S(\alpha y) + A_2 T(\alpha y) + A_3 U(\alpha y) + A_4 V(\alpha y), \quad (3)$$

в котором $A_i (i = \overline{1,4})$ – амплитуды колебаний; $\alpha^2 = \frac{\omega^2}{a^2} - \eta_0$ – собственное значение (спектральный параметр) задачи (1), (2), содержащее частоту ω поперечных колебаний стержня; $S(\alpha y)$, $T(\alpha y)$, $U(\alpha y)$, $V(\alpha y)$ – известные функции Крылова [5], [11]:

$$\begin{aligned} S(\alpha y) &= \frac{1}{2}(ch\alpha y + cos\alpha y); & T(\alpha y) &= \frac{1}{2}(sh\alpha y + sin\alpha y); \\ U(\alpha y) &= \frac{1}{2}(ch\alpha y - cos\alpha y); & V(\alpha y) &= \frac{1}{2}(sh\alpha y - sin\alpha y). \end{aligned}$$

В работе [11] подстановкой (3) в граничные условия (2) и поиском решения полученной системы уравнений относительно нетривиальных значений амплитуд $A_i (i = \overline{1,4})$ колебаний найдено решение спектральной задачи (1), (2) в виде следующего частотного уравнения:

$$\begin{aligned} -c_1 V(\alpha l) EI \alpha^3 S(\alpha l) - c_1 c_2 V^2(\alpha l) + c_1 T(\alpha l) EI \alpha^3 U(\alpha l) + c_1 c_2 T^2(\alpha l) + T^2(\alpha l) EI \alpha^3 U(\alpha l) + \\ + E^2 I^2 \alpha^6 U^2(\alpha l) + c_2 T(\alpha l) EI \alpha^3 U(\alpha l) - V(\alpha l) E^2 I^2 \alpha^6 T(\alpha l) - c_2 V(\alpha l) EI \alpha^3 S(\alpha l) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Вековое уравнение (4) позволяет находить спектр частот поперечных колебаний призматического стержня при известных его физических параметрах и известных значениях коэффициентов жесткостей левой и правой шарнирно-упругих опор стержня.

Поставлена и решена также обратная задача – задача диагностирования (акустического восстановления) коэффициентов жесткостей опор по известным значениям двух частот колебаний стержня, получены аналитические формулы для искомых параметров, которые определяют их двойственным образом.

Постановка и исследование задачи диагностирования коэффициентов жесткостей опор стержня

В продолжение исследований [11] в данной работе предложим иной метод решения обратной спектральной задачи, позволяющий диагностировать значения коэффициентов жесткостей опор стержня единственным образом, причем восстанавливать не только упругие опоры, но и определять абсолютно жесткие крепления стержня или его свободные края (опоры).

Для решения поставленной обратной задачи граничные условия (2) преобразуем к виду:

$$\begin{cases} U_1(z) = \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)_{y=0} = 0; \\ U_3(z) = \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)_{y=l} = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} U_2(z) = a_1 \left(\frac{\partial^3 z}{\partial y^3} \right)_{y=0} - a_0 z_{y=0} = 0; \\ U_4(z) = b_1 \left(\frac{\partial^3 z}{\partial y^3} \right)_{y=l} + b_0 z_{y=l} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Равенства (2) и (5) определены соответствиями:

$$\frac{c_1 l^3}{EI} = \frac{a_0}{a_1}; \quad \frac{c_2 l^3}{EI} = \frac{b_0}{b_1}; \quad (a_0, a_1, b_0, b_1 \in R). \quad (6)$$

Тогда граничные задачи (1), (2) и (1), (5) становятся равносильны в формулировках. В таком представлении задачи (1), (5) обозначим через A следующую матрицу порядка 2×4 из нулевых элементов и элементов (коэффициентов) a_0, a_1, b_0, b_1 форм $U_2(z)$ и $U_4(z)$ граничных условий (5):

$$A = \begin{vmatrix} -a_0 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_0 & b_1 \end{vmatrix}.$$

Рассмотрим также миноры 2-го порядка F_{ij} матрицы A , определяемые ее i -м и j -м столбцами ($i=1,2,3; j=2,3,4$). Имеем как нулевые миноры ($F_{12} = F_{34} = 0$) матрицы A , так и следующие ненулевые миноры:

$$F_{13} = -a_0 b_0, \quad F_{14} = -a_0 b_1, \quad F_{23} = a_1 b_0, \quad F_{24} = a_1 b_1. \quad (7)$$

В таких обозначениях граничной задачи (1), (5) **обратная задача** диагностирования коэффициентов жесткостей шарнирно-упругих опор призматического стержня приводится к поиску элементов матрицы A или коэффициентов форм $U_2(z)$ и $U_4(z)$ условий (5). По-другому, поиск матрицы A равносильно поиску оболочки $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$ вектор-столбцов $\vec{a} = (-a_0, a_1, 0, 0)^T$ и $\vec{b} = (0, 0, b_0, b_1)^T$ с координатами из элементов строк матрицы A . Что равносильно также поиску матрицы A с точностью до линейных преобразований ее строк.

Покажем теперь, что сформулированная таким образом обратная спектральная задача имеет решение и притом единственное.

Вместе с граничной задачей (1), (5) рассмотрим другую задачу, а именно задачу с уравнением (1), но с другими граничными условиями:

$$\begin{cases} U_1(z) = \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)_{y=0} = 0; \\ U_3(z) = \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)_{y=l} = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} U_2(z) = \tilde{a}_1 \left(\frac{\partial^3 z}{\partial y^3} \right)_{y=0} - \tilde{a}_0 z_{y=0} = 0; \\ U_4(z) = \tilde{b}_1 \left(\frac{\partial^3 z}{\partial y^3} \right)_{y=l} + \tilde{b}_0 z_{y=l} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

с коэффициентами $-\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \tilde{b}_0, \tilde{b}_1$ (отличными от $-a_0, a_1, b_0, b_1$ условий (5)). Для новой задачи (1), (8) рассмотрим аналогичную оболочку $\langle \vec{a}', \vec{b}' \rangle$ из векторов $\vec{a}' = (-\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, 0, 0)^T$ и $\vec{b}' = (0, 0, \tilde{b}_0, \tilde{b}_1)^T$.

В таких обозначениях сформулируем и докажем следующую теорему о существовании и единственности поставленной обратной задачи диагностирования.

Теорема. При условии, что граничные задачи (1), (5) и (1), (8) имеют одинаковые (совпадающие) и отличные от нуля собственные значения $\alpha = \alpha(\omega)$ (с учетом их кратностей) и для условий (5) и (8) выполняются равенства

$$a_0^2 + a_1^2 \neq 0, \quad b_0^2 + b_1^2 \neq 0, \quad \tilde{a}_0^2 + \tilde{a}_1^2 \neq 0, \quad \tilde{b}_0^2 + \tilde{b}_1^2 \neq 0, \quad (9)$$

то линейные оболочки из коэффициентов граничных условий будут совпадать, т.е.: $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = \langle \vec{a}', \vec{b}' \rangle$.

Доказательство.

С учетом граничных условий в виде (5) получим новое частотное уравнение к прямой спектральной задаче. Для этого подставим решения (3) уравнения (1) подставим условия (5) и получим стандартно частотный определитель в виде (с учетом выражений функции Крылова):

$$\begin{vmatrix} \alpha^2 & 0 & -\alpha^2 & 0 \\ -a_0 & a_1 \alpha^3 & -a_0 & -a_1 \alpha^3 \\ \alpha^2 \operatorname{ch} \alpha l & \alpha^2 \operatorname{sh} \alpha l & -\alpha^2 \cos \alpha l & -\alpha^2 \sin \alpha l \\ b_1 \alpha^3 \operatorname{sh} \alpha l + b_0 \operatorname{ch} \alpha l & b_1 \alpha^3 \operatorname{ch} \alpha l + b_0 \operatorname{sh} \alpha l & b_1 \alpha^3 \sin \alpha l + b_0 \cos \alpha l & -b_1 \alpha^3 \cos \alpha l + b_0 \sin \alpha l \end{vmatrix} = 0.$$

Раскрывая данный определитель и используя ненулевые F_{ij} матрицы A придем к следующему виду векового уравнения:

$$\Delta(\alpha l) = F_{13} f_1(\alpha l) + (F_{23} - F_{14}) f_2(\alpha l) + F_{24} f_3(\alpha l) = 0, \quad (10)$$

в котором функции $f_k(\alpha l)$ ($k=1, 2, 3$) выражаются как:

$$\begin{aligned} f_1(\alpha l) &= 4\alpha^4 \sin \alpha l \operatorname{sh} \alpha l; \\ f_2(\alpha l) &= -2\alpha^7 (\operatorname{ch} \alpha l \sin \alpha l + \operatorname{sh} \alpha l \cos \alpha l); \\ f_3(\alpha l) &= \alpha^{10} (1 - 2\operatorname{ch} \alpha l \cos \alpha l + \operatorname{ch}^2 \alpha l - \operatorname{sh}^2 \alpha l). \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогичные преобразования с граничной задачей (1), (8) приводят к подобному виду ее векового уравнения, а именно:

$$\tilde{\Delta}(\alpha l) = \tilde{F}_{13} f_1(\alpha l) + (\tilde{F}_{23} - \tilde{F}_{14}) f_2(\alpha l) + \tilde{F}_{24} f_3(\alpha l) = 0. \quad (12)$$

Отметим, что по теории линейных операторов частотные определители $\Delta(\alpha l)$ и $\tilde{\Delta}(\alpha l)$ образуют целые функции одного и того же порядка [12], что ведет их к тождественному равенству с точностью до постоянного множителя C , отличного от нуля, т.е.

$$\Delta(\alpha l) \equiv C \tilde{\Delta}(\alpha l), \quad (13)$$

Учитывая условия (9) теоремы и равенства (10)-(12) последнее тождество можно записать в следующем виде:

$$(a_0 b_0 - \tilde{a}_0 \tilde{b}_0) f_1(\alpha l) + (a_1 b_0 - \tilde{a}_1 \tilde{b}_0) f_2(\alpha l) - (a_0 b_1 - \tilde{a}_0 \tilde{b}_1) f_2(\alpha l) + (a_1 b_1 - \tilde{a}_1 \tilde{b}_1) f_3(\alpha l) \equiv 0. \quad (14)$$

Можно показать также, что функции $f_k(\alpha l)$ ($k=\overline{1,3}$) из (11) линейно независимы (например, разложением их в степенной ряд с помощью функционала математического пакета Maple [13]).

Тогда (14) с учетом линейной независимости $f_k(\alpha l)$ ($k=\overline{1,2,3}$) можно представить следующим векторным равенством:

$$(0, a_0 b_0, a_1 b_0, a_0 b_1, a_1 b_1, 0)^T = C (0, \tilde{a}_0 \tilde{b}_0, \tilde{a}_1 \tilde{b}_0, \tilde{a}_0 \tilde{b}_1, \tilde{a}_1 \tilde{b}_1, 0)^T. \quad (15)$$

Полученное равенство (15) означает, что отличные от нуля бивектора $\vec{a} \vec{b}$ и $\vec{a}' \vec{b}'$ находятся в пропорциональном соотношении, что ведет к биективному соответствию двумерных подпространств векторного пространства аналогичных бивекторов [14].

А т.к. каждому бивектору $\vec{x}_1 \wedge \vec{x}_2$ из произвольных базисных векторов $\vec{x}_1, \vec{x}_2$ векторного пространства соответствует подпространство $\langle \vec{x}_1, \vec{x}_2 \rangle$ линейных оболочек этих векторов, то в нашем случае из соответствия (15) бивекторов $\vec{a} \wedge \vec{b}$ и $\vec{a}' \wedge \vec{b}'$ следует равенство их линейных оболочек, т.е. $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = \langle \vec{a}', \vec{b}' \rangle$. **Теорема доказана.**

Справедливость теоремы ведет к единственности определения оболочки $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$ из векторов $\vec{a} = (-a_0, a_1, 0, 0)^T$ и $\vec{b} = (0, 0, b_0, b_1)^T$ граничных условий задачи (1), (5), что равносильно единственности диагностирования коэффициентов жесткостей левой и правой шарнирно-упругих опор участка призматического стержня по известному спектру частот его малых поперечных колебаний.

Метод акустического диагностирования коэффициентов жесткостей опор призматического стержня

Приведем теперь метод диагностирования параметров жесткости опор стержня, позволяющий показать справедливость доказанной выше теоремы, а также определить достаточное число из спектра частот колебаний стержня для восстановления искомых параметров.

Итак, известны физические характеристики стержня, а также значения частот его малых поперечных колебаний. Необходимо определить (восстановить) параметры жесткости опор стержня в соответствии заданному спектру его частот колебаний.

Рассмотрим спектральные значения α_i ($i = \overline{1,3}$) задачи (1), (5), которые и задают значения трех частот ω_i ($i = \overline{1,3}$) колебаний стержня. С учетом спектральных значений α_i ($i = \overline{1,3}$) – корней векового уравнения (12), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} F_{13}f_1(\alpha_1 l) + (F_{23} - F_{14})f_2(\alpha_1 l) + F_{24}f_3(\alpha_1 l) = 0; \\ F_{13}f_1(\alpha_2 l) + (F_{23} - F_{14})f_2(\alpha_2 l) + F_{24}f_3(\alpha_2 l) = 0; \\ F_{13}f_1(\alpha_3 l) + (F_{23} - F_{14})f_2(\alpha_3 l) + F_{24}f_3(\alpha_3 l) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

от неизвестных четырех миноров $F_{13}, F_{14}, F_{23}, F_{24}$, задающих по доказанной теореме однозначно (с точностью до постоянного множителя) бивектор вида:

$$(0, F_{13}, F_{14}, F_{23}, F_{24}, 0)^T.$$

Найденный бивектор и позволит единственным образом определить матрицу A из коэффициентов форм $U_2(z)$ и $U_4(z)$ условий (5), т.е. восстановить граничные условия спектральной задачи (1), (5).

Поиск бивектора по трем заданным частотам колебаний стержня приведем на следующих примерах с привлечением к численным расчетам команд и функций математического пакета Maple.

Пример 1. Рассматривается спектральная задача (1), (5) малых поперечных колебаний для призматического стержня с характеристиками:

$$\begin{aligned} l &= 0,1 \text{ м}, \quad S = 0,0035 \text{ м}^2, \quad E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}, \\ I &= 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4, \quad \rho = 7850 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \quad \eta = 0,25, \end{aligned} \quad (17)$$

для которого известны собственные значения $\alpha_1 = 4,7222$, $\alpha_2 = 7,8512$, $\alpha_3 = 10,9949$, определяемые первые три значения из спектра частот колебаний.

Найдем соответствующие собственным значениям коэффициенты жесткостей шарнирно-упругих опор стержня.

Решение. Подстановка заданных значений α_i ($i = \overline{1,3}$) в (15) с учетом коэффициентов уравнения (1) при параметрах (17) дает следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 1,117749 \cdot 10^5 F_{13} + 5,943289 \cdot 10^6 (F_{23} - F_{14}) - 4,971381 \cdot 10^6 F_{24} = 0; \\ -1,952954 \cdot 10^7 F_{13} - 4,714456 \cdot 10^9 (F_{23} - F_{14}) + 3,9932 \cdot 10^9 F_{24} = 0; \\ 1,741275 \cdot 10^9 F_{13} + 1,15655 \cdot 10^{12} (F_{23} - F_{14}) - 9,7001 \cdot 10^{11} F_{24} = 0, \end{cases}$$

решение которой с помощью пакета Maple имеет вид:

$$F_{13} = -0,25000010C; F_{24} = -0,74999982C; F_{14} = 0,49999987C; F_{23} = 1,5000014C, \\ C = const \neq 0.$$

Значит, с точностью до постоянного множителя имеем:

$$(0, F_{13}, F_{14}, F_{23}, F_{24}, 0)^T \approx (0, -1, -3, 2, 6, 0)^T.$$

Будем искать коэффициенты условий (5) в виде оболочки $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$, для чего определим любой вектор $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ этой оболочки с учетом равенства [14]

$$\text{rank} \begin{vmatrix} -a_0 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_0 & b_1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{vmatrix} = 2.$$

Если рассмотреть нетривиальный минор матрицы A из коэффициентов условий (5), например, $F_{13} \neq 0$, то последнее равенство выполняется при тривиальности окаймляющих F_{13} миноров третьего порядка, а именно:

$$\begin{vmatrix} -a_0 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & b_0 \\ x_1 & x_2 & x_3 \end{vmatrix} = 0, \quad \begin{vmatrix} -a_0 & 0 & 0 \\ 0 & b_0 & b_1 \\ x_1 & x_3 & x_4 \end{vmatrix} = 0.$$

Или получим равенства: $x_1 F_{23} - x_2 F_{13} = 0$, $-x_3 F_{14} + x_4 F_{13} = 0$, из которых имеем следующие приближения: $F_{13} = -a_0 b_0 \approx -1$, $F_{14} = -a_0 b_1 \approx -3$, $F_{23} = a_1 b_1 \approx 2$.

Значит, произвольный вектор искомой линейной оболочки $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$ можно принять в виде: $\vec{x} = (x_1, -2x_1, x_3, -3x_3)^T$. По-другому, матрица A из коэффициентов условий (5) равна:

$$A = \begin{vmatrix} -1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{vmatrix}.$$

В итоге коэффициенты жесткостей упруго-шарнирных опор призматического стержня при заданных собственных значениях и параметрах (17) с учетом (6) восстанавливаются однозначно в виде: $c_1 = 2 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$, $c_2 = 2,5 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$.

Пример 2. Пусть для той же задачи (1), (5) при параметрах (17) заданы собственные значения $\alpha_1 = 6,1870$, $\alpha_2 = 9,4408$, $\alpha_3 = 12,8794$. Найдем граничные условия.

Решение. При заданных значениях и параметрах (17) получим, что система (16) имеет решение:

$$F_{13} = -0,89754 \cdot 10^{17} C; F_{24} = -0,999997C; F_{14} = 0,99999986C; F_{23} = 1,00000012C, \\ C = const \neq 0.$$

Тогда по аналогичному алгоритму, проведенному в примере 1, имеем: $(0, F_{13}, F_{14}, F_{23}, F_{24}, 0)^T \approx (0, -1, 0, 0, 0, 0)^T$, откуда следуют следующие равенства:

$$F_{13} = a_0 b_0 \approx -1, F_{14} = a_0 b_1 \approx 0, F_{23} = a_1 b_1 \approx 0.$$

В итоге определяется матрица граничных условий (5) в виде: $A = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$.

Из полученной матрицы (учитывая (6) и (17)) видим, что коэффициенты жесткостей c_1, c_2 шарнирно-упругих опор стержня стремятся к бесконечности, т.е. имеем абсолютно жесткие крепления краев стержня.

Таким образом, численные расчеты подтверждают единственность диагностирования параметров жесткости опор призматического стержня по известным значениям трех частот его поперечных колебаний.

Отметим также, что расчеты в Maple (с точностью до 10^{-20}) показывают, что при поиске коэффициентов жесткостей шарнирно-упругих опор стержня решались одновременно с обратными задачами диагностирования, и прямые спектральные задачи, которые подтверждали заданные частоты колебаний при восстановленных параметрах жесткостей опор стержня.

Заключение

В проведенном исследовании поставлена и решена задача диагностирования параметров жесткостей опор призматического стержня по спектру частот его свободных поперечных колебаний.

Исследовано существование решения поставленной обратной спектральной задачи. Для этого введены в рассмотрение матрица с минорами из коэффициентов граничных условий спектральной задачи, а также еще одна граничная задача с аналогичным вековым уравнением, но с другими параметрами жесткости. Представлены условия для единственности решения задачи с доказательством соответствующей теоремы.

Дан алгоритм решения задачи по известным значениям трех частот из спектра поперечных колебаний стержня, сведенный к поиску решения системы уравнений относительно искомых параметров жесткости упруго-шарнирных опор стержня. Численные расчеты искомых параметров с привлечением функционала Maple показывают сформулированные результаты аналитических исследований по прямой и обратной спектральным задачам.

Представленный алгоритм можно применять при решениях аналогичных обратных задач диагностирования граничных условий для механических систем (или их частей в виде стержней, роторов, дисков, валов, балок и т.д.) с распределенными параметрами или с конечным числом степеней свободы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmadian H., Mottershead J. E., Friswell M. I. Boundary condition identification by solving characteristic equation // J. Sound Vibrat. – 2001. № 247. – PP. 755-763.
2. Александров А.В. Строительная механика. Динамика и устойчивость упругих систем: учеб. пособие для вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, В.Б. Зылев; под ред. А.В. Александрова. – М.: Высшая школа, 2008. – 384 с.
3. Hung-Jen Liu, Nien-Sheng Hsu, Tim Hau Lee. Simultaneous identification of parameter, initial condition, and boundary condition in groundwater modelling // Hydrol. Process. – 2009. № 23. – PP. 2358-2367.
4. Ахтямов А.М. Теория идентификации краевых условий и ее приложения. – М.: Физматлит, 2009. – 272 с.
5. Генкин М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
6. Костюков В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин / В. Н. Костюков, А. П. Науменко. – Омск: ОмГТУ, 2011. – 360 с.
7. Павлов Б.В. Акустическая диагностика механизмов. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.
8. Сафина Г.Ф. Диагностирование жесткостей опор валов обрабатывающего механизма по частотам его асимметричных колебаний // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. № 3 (365). – С. 21-25.
9. Юрко В.А. Введение в теорию обратных спектральных задач. – М.: Физматлит, 2007. – 384 с.
10. Белый В.Д. Поперечные колебания стержней. Учеб. пособие. – Омск: ОмПИ, 1983. – 83 с.
11. Ялалова М.Г. Прямая и обратная задачи свободных колебаний призматических стержней // Первые шаги в науку третьего тысячелетия: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2016. – С. 533-536.
12. Левин Б.Я. Распределение корней целых функций. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 632 с.
13. Дьяконов В.П. Maple 7. Учебный курс / В.П. Дьяконов – СПб.: Питер, 2002. – 672 с.
14. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. 5-е изд. – М.: Физматлит, 2004. – 560 с.

Сафина Гульнара Фриловна

Нефтекамский филиал ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»,
Кандидат физико-математических наук, доцент,
452680, Республика Башкортостан, г. Нефтекамск, ул. Тракторная, д.1.
Тел. 8(917) 40–399–79
E-mail: safinagf@mail.ru

SAFINA G.F.

SINGULARITY OF DIAGNOSTICS OF STIFFNESS PARAMETERS OF HINGED ELASTIC SUPPORTS OF PRISMATIC ROD

Abstract: Problem of diagnostics of stiffness coefficients of hinge-elastic supports of prismatic rod by known values of frequencies of its transverse oscillations is considered in the paper. The boundary problem is formulated mathematically in such a way that it allows determining not only elastic supports, but also absolutely rigid fasteners of the rod supports. The conditions were investigated and the theorem on the existence and uniqueness of the solution of the problem was proved. To this end, another problem with the same equation but different from the original coefficients of the boundary conditions is considered together with the boundary problem. An algorithm for diagnosing the required stiffness parameters of prismatic rod supports is given, which allows finding a solution of a system of three algebraic equations with four unknowns at known three values of frequencies of its transverse oscillations. Using the presented solution algorithm, numerical calculations of the required stiffness parameters using the Maple package are given, confirming the uniqueness of the diagnosis, as well as the possibility of establishing absolutely rigid fasteners of the rod.

Keywords: prismatic rod, boundary value problem, secular equation, oscillation frequencies, stiffness coefficients, diagnostics, solution algorithm.

BIBLIOGRAPHY

1. Ahmadian H., Mottershead J. E., Friswell M. I. Boundary condition identification by solving characteristic equation // J. Sound Vibrat. – 2001. № 247. – S. 755-763.
2. Alecsandrov A.V. Construction mechanics. Dynamics and oral chivnost of elastic systems: studies, allowance for universities/A.V. Aleksandrov, V.D. Potapov, V.B. Zylev; ed. A.V. Aleksandrova. – M.: Higher School, 2008. – 384 s.
3. Hung-Jen Liu, Nien-Sheng Hsu, Tim Hau Lee. Simultaneous identification of parameter, initial condition, and boundary condition in groundwater modelling // Hydrol. Process. – 2009. № 23. – S. 2358-2367.
4. Akhtyamov A.M. Theory of identification of boundary conditions and its applications. – M.: Fizmatlit, 2009. – 272 s.
5. Genkin M.D. Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms / M.D. Genkin, A.G. Sokolova. – M.: Mechanical Engineering, 1987. – 288 s.
6. Kostyukov V.N. Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and machine monitoring / V.N. Kostyukov, A.P. Naumenko. – Omsk: OmGTU, 2011. – 360 s.
7. Pavlov B.V. Acoustic diagnostics of mechanisms. – M.: Mechanical Engineering, 1971. – 224 s.
8. Safina G.F. Diagnosing the stiffness of the supports of the shafts of the processing mechanism by the frequencies of its asymmetric vibrations // Fundamental and applied problems of technology and technology. – 2024. № 3 (365). – S. 21-25.
9. Yurko V.A. Introduction to the theory of inverse spectral problems. – M.: Fizmatlit, 2007. – 384 s.
10. White V.D. Transverse oscillations of rods. Tutorial. – Omsk: OmPI, 1983. – 83 s.
11. Yalalova M.G. Direct and inverse problems of free oscillations of prismatic rods // The first steps into science of the third millennium: Materials of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference. – Ufa: RIC BashSU, 2016. – S. 533-536.
12. Levin B.Ya. Distribution of roots of whole functions. – M.: GITTLE, 1956. – 632 s.
13. Dyakonov V.P. Maple 7. Training course/V.P. Dyakonov – St. Petersburg: Peter, 2002. – 672 s.
14. Gantmacher F.R. Theory of matrices. 5th ed. – M.: Fizmatlit, 2004. – 560 s.

Safina Gulnara Frilovna

Ph.D., associate professor
«Ufa University of Science and Technology» Neftekamsk branch,
452680, Bashkortostan, Neftekamsk, Traktovaya, 1.
Ph.: 8(917) 40–399–79
E-mail: safinagf@mail.ru

БРЫЛОВА Т.Б., ГРИЦ Д.Б., КОНДРАТЕНКО Е.В., ФОМЕНКО В.К.

ДЕФОРМАЦИЯ КОТЛА ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ

Аннотация. *Перевозка жидких нефтепродуктов является одним из наиболее массовых направлений транспортной отрасли Российской Федерации. Особую сложность вызывает перевозка и дальнейшая выгрузка вязких нефтепродуктов самотеком в условиях пониженных температур. С целью обеспечения возможности выгрузки вязких нефтепродуктов применяется предварительный разогрев груза. Большое распространение получила технология разогрева путем подачи пара под давлением 3-4 атм. в специальные полости – паровые рубашки. После выгрузки выполняются промывочно-пропарочные операции с последующей дегазацией и контролем внутренней полости котла цистерны. Порядка 30% брака по вагонам-цистернам приходится на вмятины котла, направленные внутрь котла. Образование таких вмятин возможно под действием избыточного внешнего давления. Статья посвящена определению критических давлений как внутри котла цистерны, так и в полости паровой рубашки, вызывающих процесс вмятинообразования.*

Ключевые слова: вагон-цистерна, давление, вмятина, котел, материал.

Введение

Вагон-цистерна представляет собой сложнейший технический объект, который эксплуатируется в самых различных, зачастую весьма жестких условиях и к настоящему моменту составляют 13% общей численности вагонного парка, причем 83% из них составляют вагоны-цистерны для перевозки нефтепродуктов [1].

Для перевозки темных нефтепродуктов применяются специализированные вагоны-цистерны с паро-обогревательной рубашкой, необходимой для разогрева перевозимого груза (рисунок 1).

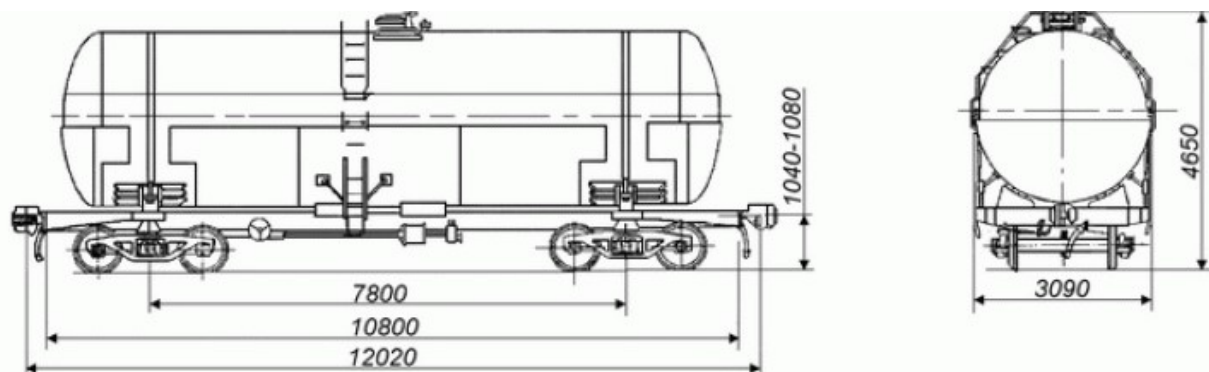


Рисунок 1 – Цистерна с паро-обогревательной рубашкой

Одним из критических дефектов железнодорожных цистерн является образование вмятин на поверхности котла цистерны, направленных внутрь котла. По некоторым экспертным оценкам до 30% брака цистерн приходится на вмятины [1]. Причем, наиболее опасным видом повреждений, проявляемых на стадии предразрушения, являются как вмятины, так и вмятинообразные повреждения (рисунок 2). Примером могут служить:

- вмятины в зоне сварного шва, соединяющего панели обечайки котла, в верхней части опоры котла;
- вмятины в зоне лежневых опор, вызванные систематическим перегрузом цистерн;
- вмятинообразные длинноразмерные изменения формы днища (и, или проседание и наклон верхней части) обечайки цистерны;
- вмятинообразные дефекты цилиндрической части котла (вмятость боковой части).

Существуют четкие сигналы, при которых эксплуатация цистерны должна быть немедленно прекращена:

- Глубина вмятины превышает 5% от толщины стенки
- Обнаружены трещины любой длины
- Вмятина расположена в зоне сварного шва или около люка
- Есть признаки коррозии в месте деформации
- Изменение формы сопровождается складками или разрывами металла

Допускается не более двух отдельных вмятин глубиной не более 40 мм на площади 0,5 м² расположенных на цилиндрической части котла и днище, за исключением зоны крепления котла к раме (зоны лап и лежней) и опорных зон на расстоянии 200 мм до опоры и на сварных швах.



*Рисунок 2 – Вмятина обечайки котла в зоне паровой рубашки
(вид вмятины снаружи, паровая рубашка демонтирована)*

Основная часть

В основу прочностных расчетов положены ГОСТ 34233.1-2017 – 34233.12-2017 [2 – 13], в которых подробно изложены методики расчета элементов оборудования. Особое внимание следует обратить на ГОСТ 34233.8-2017, посвященный расчету на прочность аппаратов с рубашками, а также ГОСТ 34233.11-2017, в котором приведена методика по учету овальности и угловатости обечаек и днищ и смещения кромок сварных соединений при нормативных расчетах на прочность.

В прочностных расчетах избыточное давление может быть наружным или внутренним. В рассматриваемом случае, когда возникает вмятина, направленная внутрь котла цистерны, наблюдается разряжение внутреннего давления и принято считать, что этот элемент испытывает воздействие избыточного наружного давления, равного разности атмосферного давления и абсолютного давления в пространстве аппарата.

Исходя из вышеизложенного, котел цистерны необходимо проверить на прочность и на устойчивость под действием избыточного наружного давления.

К нагрузкам, приводящим к риску потери устойчивости относятся: избыточное наружное давление, сжимающая осевая сила, изгибающий момент и поперечная (перерезывающая) сила. В случае одновременного действия нескольких нагрузок выполняется проверочный расчет по каждой из нагрузок, а в случае выполнения условий прочности и устойчивости выполняется расчет совместности:

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1, \quad (1)$$

где p – расчетное давление, МПа,
 F – расчетная осевая сила, Н,

M – расчетный изгибающий момент, Н·м,
 Q – расчетная поперечная сила, Н,
 $[p]$ – допустимое давление, МПа,
 $[F]$ – допустимая осевая сила, Н,
 $[M]$ – допустимый изгибающий момент, Н·м,
 $[Q]$ – допустимая поперечная сила, Н.

С точки зрения определения допустимых напряжений ГОСТом регламентировано два подхода: по предельным нагрузкам и по условным упругим напряжениям. Расчет по условным упругим напряжениям выполняют при расчете узлов, испытывающих высокие локальные напряжения (фланцы, кожухотрубные аппараты и пр.). Для условий работы котла цистерны применим вариант расчета по предельным нагрузкам, для которого допустимые напряжения определяются исходя из меньшего значения отношения, МПа:

$$[\sigma] = \eta \cdot \min \left\{ \frac{R_T}{n_T}; \frac{R_B}{n_B} \right\}, \quad (2)$$

где η – коэффициент, учитывающий способ изготовления заготовки;

R_T – предел текучести при расчетной температуре, МПа;

R_B – временное сопротивление при расчетной температуре, МПа;

n_T – коэффициент запаса по пределу текучести;

n_B – коэффициент запаса по временному сопротивлению.

Коэффициент η принимается равным единице для всех заготовок, кроме литых. С учетом технологии производства котла цистерны, значение коэффициент так же будет равно единице. Коэффициент запаса по временному сопротивлению для сталей принимается равным 2,4. Коэффициент запаса по пределу текучести принимается для рабочих условий – 1,5; для условий монтажа – 1,1; для гидравлических испытаний – 1,2; для пневматических испытаний – 1,1.

Отталкиваясь от технической документации, основными материалами, применяемые при производстве котла цистерны являются стали 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2, 09Г2СД-12. Используя приложения А и Б ГОСТ 34233.1-2017, в таблице 1 [2] приведены механические характеристики указанных материалов.

Таблица 1 – Расчетные механические характеристики материалов

Материал	09Г2С				09Г2		
Температура, °С	20		100		20	100	
Толщина, мм	До 32	Свыше 32	До 32	Свыше 32	Не нормируется		
Допускаемое напряжение $[\sigma]$, МПа	195	183	177	177	160	180	160
Предел текучести R _т , МПа	300	280	265,5	265,5	240	270	240
Временное сопротивление R _в , МПа	470	440	425	425	385	440	385
Модуль продольной упругости 10 ⁻⁵ E, МПа	1,99		1,91		1,99	1,91	
Коэффициент линейного расширения	11,6						
Расчетное допускаемое напряжение $[\sigma]$, МПа	195,83	183,33	177	177	160	180	160

Рассматривая ГОСТ 34233.5-2017 [6], можно выделить следующую последовательность выполнения нормативного расчета несущей способности цилиндрической обечайки в местах установки седловых опор и в пролетах между ними:

- выполняют расчет по выбору основных размеров и поверочный расчет несущего элемента от воздействия внутреннего или наружного избыточного давления, внешних осевых сил и изгибающих моментов и другие необходимые нормативные расчеты;
- определяют нагруженный вес аппарата;
- определяют нагрузки на опорные узлы и несущий элемент в пролете между опорами: опорные усилия, поперечные силы, действующие на обечайку в сечениях над опорами, локальные изгибающие моменты в сечениях над опорами и максимальный изгибающий момент в пролете между опорами; для этого расчетную схему аппарата сводят к балке кольцевого сечения и проводят расчет сил и моментов методами сопротивления материалов;
- по расчетным опорным усилиям принимают стандартные седловые опоры с ближайшими большими номинальными несущими способностями;
- проверяют прочность и устойчивость обечайки в пролетах между опорами по расчетным изгибающим моментам, действующим между опорами; для аппаратов, работающих под избыточным наружным давлением, проверяют условие совместности воздействия избыточного давления и изгибающего момента; при этом допустимые изгибающие моменты и избыточные давления рассчитывают по ГОСТ 34233.2–2017 [3];
- для каждого опорного узла по геометрическим размерам принятых седловых опор и геометрическим размерам аппарата рассчитывают коэффициенты влияния формы опорных конструкций на опорные реакции в сечениях над опорами;
- для каждого опорного узла рассчитывают предельные локальные изгибные напряжения;
- для каждого опорного узла рассчитывают допустимые опорные усилия и выполняют проверку прочности по опорным усилиям;
- для каждого опорного узла рассчитывают эффективные усилия на опорные узлы;
- для каждого опорного узла выполняют проверку прочности и устойчивости по условию совместного воздействия избыточного давления, эффективного усилия, локального изгибающего момента и поперечной силы в сечении над опорой; при этом допустимые значения нагрузок рассчитывают по ГОСТ 34233.2–2017 [3].

Основываясь на том, что котел цистерны является серийно выпускаемым изделием, основным моментом с точки зрения выполнения расчетов является проверка прочности и устойчивости обечайки в пролетах между опорами по расчетным изгибающим моментам, действующим между опорами; для аппаратов, работающих под избыточным наружным давлением, проверка условия совместности воздействия избыточного давления и изгибающего момента.

Для оболочек средней длины можно пренебречь краевым эффектом. Тогда радиальные перемещения срединной поверхности оболочки определяются уравнениями безмоментной теории оболочек [14]. Применительно к цилиндрическим оболочкам, находящимся под воздействием осевого давления, радиальные перемещения срединной поверхности оказываются равными:

$$w = \frac{\nu p R}{E}; \quad (3)$$

$$w_0 = \frac{q_f R^2}{Eh}, \quad (4)$$

где p – плотность распределения сжимающих сил P по площади торцевой поверхности оболочки;

q_f – фиктивное боковое давление;

E – модуль нормальной упругости;

ν – коэффициент Пуассона изотропного материала оболочки;

h – толщина,

R – радиус срединной поверхности оболочки.

Исходя из этого величина фиктивного бокового давления может быть выражена:

$$q_f = \frac{\nu p h}{R}. \quad (5)$$

Расчетную формулу получим применительно к цилиндрической оболочке средней длины, потеря устойчивости которой сопровождается появлением n полных волн по окружности оболочки. В этом случае можно воспользоваться приближенными решениями классической теории. При комбинированном нагружении цилиндрической оболочки сжимающими осевыми силами и внешним боковым давлением критические нагрузки приближенно определяются формулами [5]:

$$\frac{p_k}{p_B} + \frac{q_k}{q_B} = 1, \quad (6)$$

где p_k, q_k – критические величины осевой силы и бокового давления при комбинированном нагружении оболочки;

p_B, q_B – верхние критические величины осевой силы и бокового давления при раздельном нагружении оболочки, определяемые классической теорией устойчивости,

$$p_B = \frac{\frac{Eh}{R}}{\sqrt{3(1-\nu^2)}}; \quad (7)$$

$$q_B = \frac{\frac{0,855ER}{l}}{(1-\nu^2)^{0,75}} \left(\frac{h}{R} \right). \quad (8)$$

Тогда, с помощью фиктивного компенсирующего давления получаем формулу определения критической силы:

$$p_k = \frac{\frac{Eh}{R}}{\left[1 + 0,675\nu^4 \sqrt{\frac{(1-\nu^2)R^2}{h^2} \frac{l}{R}} \right] \sqrt{3(1-\nu^2)}}. \quad (9)$$

При действии на цилиндрическую оболочку внешнего бокового давления q в теории устойчивости исходную форму равновесия принимают соответствующей безмоментному напряженному состоянию. Для компенсации радиальных перемещений, вызванных боковым давлением, следует к торцам цилиндрической оболочки приложить компенсирующие осевые силы p_f . Фиктивные компенсирующие силы p_f найдем из равенства радиальных перемещений двух смежных форм равновесия в момент потери устойчивости, в котором перемещения от воздействия бокового давления равны:

$$w = -\frac{qR^2}{Eh}, \quad (10)$$

а перемещения от действия компенсирующих осевых сил:

$$w_0 = -\frac{\nu p_f R}{E}; \quad (11)$$

В результате фиктивное компенсирующее давление определяется по формуле:

$$p_f = \frac{qR}{\nu h}. \quad (12)$$

Расчетную формулу найдем исходя из приближенных решений классической теории применительно к цилиндрической оболочке средней длины с помощью осевого компенсирующего давления p_f :

$$p_k = \frac{\frac{\nu E h^2}{R^2}}{\left[1 + 0,675 \nu^4 \sqrt{\frac{(1-\nu^2) R^2}{h^2}} \frac{l}{R} \right] \sqrt{3(1-\nu^2)}}. \quad (13)$$

Приведенная формула так же справедлива при рассмотрении действия всестороннего давления.

Применительно к рассматриваемому типу цистерн исходными данными являются:

E – модуль нормальной упругости $1,99 \cdot 10^5$ МПа;

ν – коэффициент Пуассона изотропного материала оболочки 0,3;

h – толщина 10 мм,

R – радиус срединной поверхности оболочки 1510 мм.

l – длина котла 10770 мм.

С учетом исходных данных критическое давление, вызывающее деформацию котла цистерны будет составлять 0,086 МПа. Учитывая, что деформация вызвана избыточным наружным давлением, величина давления внутри котла цистерны должна составлять менее 0,014 МПа. Исходя из условий эксплуатации и технологии слива темных нефтепродуктов, добиться такого давления в котле цистерны не представляется возможным.

Полученное значение разности давлений 0,086 МПа сопоставимо с результатами расчетов опубликованных в статье «О причинах деформации обечайки котлов вагонов-цистерн для вязких нефтепродуктов» [15]: «При повышении внешнего давления до сверхнормативного значения (до 79 кПа и выше) при фактически измеренных толщинах без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла может произойти потеря устойчивости». Незначительное различие результатов связано с рассмотрением цистерн разных моделей, а также отличающимися данными материалов и допущений, принятых непосредственно вначале расчета.

Как правило, вмятина котла цистерны, образовавшаяся в зоне разогрева перевозимого груза, сопровождается наличием на кожухе паровой рубашки деформаций, характерных для вздутия рубашки от избыточного давления.

Согласно [16] для разогрева перевозимого груза пар подается к патрубку, установленного на корпусе сливного прибора, под давлением 3-4 атм, далее пар должен расширяться до давления не более 0,4 атм. (0,04 МПа) отдавая тепло металлическим поверхностям, сконденсироваться на нагреваемых поверхностях обечайки котла и удалиться в виде конденсата по боковым патрубкам, расположенных у торцевых днищ цистерны.

Сопряжение паровой рубашки с котлом цистерны соответствует рисунку А.2, б [9] и приведено на рисунке 3.

Для определения допускаемого избыточного давления в паровой рубашке воспользуемся методикой, приведенной в [9], для этого необходимо определить ряд вспомогательных величин.

Коэффициенты прочности сварных швов:

$\varphi_{p1} = 1$ – коэффициент прочности сварного кольцевого шва сосуда;

$\varphi_{p2} = \varphi_{T2}$,

φ_{T2} – коэффициент прочности сварного кольцевого шва рубашки.

Параметры кольца:

H – относительный размер кольца;

P – относительное давление, МПа;

Q – геометрический параметр кольца.

$$H = \frac{h_0 - c}{\sqrt{D_1(s_1 - c)}}; \quad (14)$$

$$P = \frac{p_2}{[\sigma]_0 \varphi_{n0}}; \quad (15)$$

$$Q = \frac{D_1 \varphi_{n1}}{2b_0 \varphi_{n0}}. \quad (16)$$

Относительный момент нагружения:

$$M_0 = \frac{e_0}{b_0} \frac{D_2^2}{2D_1(s_1 - c)} A. \quad (17)$$

Коэффициент осевого усилия:

$$A = \frac{D_1 \cdot D_2 - d_1^2}{D_2^2}, \quad (18)$$

где d_1 – диаметр окружности сопряжения рубашки с дном, мм.

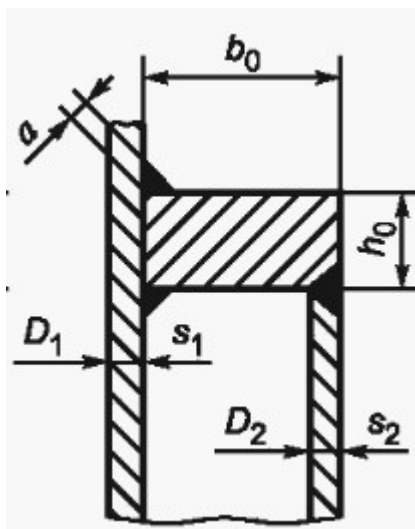


Рисунок 3 – Сопряжение рубашки с корпусом:

D_1 – внутренний диаметр сосуда, мм; D_2 – внутренний диаметр рубашки, мм;
 s_1 – исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки сосуда, мм;
 s_2 – исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки рубашки, мм; b_0 – ширина кольца, мм;
 h_0 – исполнительная толщина кольца, мм, a – размер сварного шва, мм.

В рассматриваемом случае значение d_1 принимается равным нулю, так как отсутствует кольцевое размещение сопряжения с дном.

Относительный реактивный момент в стенке сосуда:

$$M_1 = \frac{[\sigma]_1 (s_1 - c)}{2[\sigma]_0 \varphi_{n0} b_0} \left[2 - \frac{1}{2} \left(\frac{p_1 D_1}{2[\sigma]_1 (s_1 - c)} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{(p_1 - p_2) D_1}{2[\sigma]_1 (s_1 - c)} \right)^2 \right]. \quad (19)$$

Относительный реактивный момент в стенке рубашки:

$$M_2 = \frac{[\sigma]_2 (s_2 - c) \varphi_{p2}}{2[\sigma]_0 \varphi_{n0} b_0} \frac{D_2 (s_2 - c)}{D_1 (s_1 - c)}. \quad (20)$$

Относительный реактивный момент в месте сопряжения кольца со стенкой сосуда:

$$M_3 = \min \{ QH^2; (1 + 2H) M_1 \}. \quad (21)$$

Допускаемое избыточное давление в рубашке:

$$[p_2] = \left(H^2 + M_2 + M_3 \right) \frac{[\sigma]_0 \varphi_{n0}}{M_0}. \quad (22)$$

При расчете приняты следующие допущения:

1. Сумма прибавок к толщине стенок равна нулю;
2. Толщина листа котла цистерны равна 10 мм;
3. Толщина листа паровой рубашки равна 3 мм;
4. Допускаемое напряжение для материала паровой рубашки соответствует

временному сопротивлению (так как это максимальное напряжение, при котором материал выдерживает нагрузку, предшествующую его разрушению) и составляет 425 МПа.

5. Коэффициенты прочности сварных швов равны друг другу и составляют 0,9.

С учетом принятых допущений допускаемое избыточное давление не вызывающего разрушения металла и сварных швов на разрыв в паровой рубашке с толщиной кожуха 3 мм составляет 0,081 МПа, что, в свою очередь больше в два раза соответствующего предельного значения давления, допускаемого в эксплуатации (0,04 МПа).

Такое увеличение давления в полости паровой рубашки возможно в случае неисправных дренажных отверстий, которые могут закупориться коррозированными частями металла, как котла цистерны, так и паровой рубашки.

Заключение

Разрыв сварного шва паровой рубашки в эксплуатации связан с прочностными характеристиками сварного шва. Наличие дефекта в сварном шве значительно снижает его прочностные характеристики.

Расчётные значения избыточного давления, вызывающего потерю устойчивости обечайки котла цистерны (0,086 МПа) и избыточного давления в паровой рубашке котла (0,081 МПа) являются практически сопоставимыми между собой, другими словами – при достижении избыточного давления в паровой рубашке котла цистерны более 0,08 МПа, возникают условия для потери устойчивости обечайки котла, расположенной именно под паровой рубашкой в зоне наибольшей площади воздействия пара на обечайку котла цистерны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мойкин, Д. А. Определение браковочных характеристик и влияние повреждений на работоспособность вагонов-цистерн / Д. А. Мойкин // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2005. – № 8. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-brakovochnykh-harakteristik-i-vliyanie-povrezhdeniy-na-rabotosposobnost-vagonov-tsistern> (дата обращения: 01.12.2025).
2. ГОСТ 34233.1-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 30 с.
3. ГОСТ 34233.2-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 58 с.
4. ГОСТ 34233.3-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 46 с.
5. ГОСТ 34233.4-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 41 с.
6. ГОСТ 34233.5-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 41 с.
7. ГОСТ 34233.6-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 24 с.
8. ГОСТ 34233.7-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 53 с.
9. ГОСТ 34233.8-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты с рубашками. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 27 с.
10. ГОСТ 34233.9-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Аппараты колонного типа. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 23 с.
11. ГОСТ 34233.10-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты, работающие с сероводородными средами. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 5 с.
12. ГОСТ 34233.11-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Метод расчета на прочность обечаек и днищ с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 16 с.

13. ГОСТ 34233.12-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Требования к форме представления расчетов на прочность, выполняемых на ЭВМ. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 4 с.

14. Пикуль, В. В. Современные проблемы науки в области прикладной механики : учебник : в 2 ч. / В. В. Пикуль. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2003–2005.

Ч. 1 : Механика деформируемого твердого тела. – 2003. – 263 с.

Ч. 2 : Механика оболочек. – 2005. – 524 с.

15. Цыганская, Л. В. О причинах деформации обечайки котлов вагонов-цистерн для вязких нефтепродуктов / Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн, Н. А. Атаманчук // Бюллетень результатов научных исследований. – 2024. – № 4 / Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, АО «НВЦ «Вагоны». – Санкт-Петербург, 2024. – С. 24–39.

16. Правила перевозок жидких грузов наливом в вагонах цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума: утв. на пятидесятом заседании Совета по железнодорож. транспорту 22.05.2009 г. / отв. за вып. В.А. Александрович. – Минск: Тесей, 2009. – 96 с.

Брылова Татьяна Борисовна

ФГБОУ ВО ОмГУПС, г. Омск

Доцент кафедры вагоны и вагонное хозяйство
644046, г. Омск, проспект Карла Маркса, дом 35

E-mail: biser65@mail.ru

Гриц Дмитрий Борисович

ФГБОУ ВО ОмГУПС, г. Омск

Доцент кафедры вагоны и вагонное хозяйство
644046, г. Омск, проспект Карла Маркса, дом 35

E-mail: gritstmdm@mail.ru

Кондратенко Евгений Владимирович

ФГБОУ ВО ОмГУПС, г. Омск

Доцент кафедры вагоны и вагонное хозяйство
644046, г. Омск, проспект Карла Маркса, дом 35

E-mail: kondratenkov@list.ru

Фоменко Валентин Константинович

ФГБОУ ВО ОмГУПС, г. Омск

Доцент кафедры локомотивы
644046, г. Омск, проспект Карла Маркса, дом 35

E-mail: fomenkovk@mail.ru

BRYLOVA T.B., GRITS D.B., KONDRATENKO E.V., FOMENKO V.K.

DEFORMATION OF THE CISTERN CARRIAGE

Abstract. *The transportation of liquid petroleum products is one of the most common activities in the Russian transport industry. The transportation and subsequent unloading of viscous petroleum products by gravity in low temperatures poses particular challenges. To ensure the unloading of viscous petroleum products, preheating of the cargo is used. A widely used heating technology involves injecting steam at 3-4 atm into special cavities called steam jackets. After unloading, flushing and steaming operations are performed, followed by degassing and inspection of the tank car boiler interior. Approximately 30% of tank car defects are caused by inward-facing dents in the boiler. Such dents can form under excessive external pressure. This article examines the critical pressures both within the tank car boiler and in the steam jacket cavity that cause dent formation.*

Keywords: *cistern carriage, pressure, dent, boiler, material.*

BIBLIOGRAPHY

1. Moykin, D. A. Opredeleniye brakovochnykh kharakteristik i vliyaniye povrezhdeniy na rabotosposobnost vagonov-tsistern / D. A. Moykin // Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsionalnogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta. – 2005. – № 8. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-brakovochnykh-kharakteristik-i-vliyanie-povrezhdeniy-na-rabotosposobnost-vagonov-tsistern> (data obrashcheniya: 01.12.2025).

2. ГОСТ 34233.1-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общечие требования. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 30 с.

3. ГОСТ 34233.2-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечайек, выпуклых и плоских днищ и крышек. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 58 с.

4. ГОСТ 34233.3-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлении. Расчет на прочность обечайек и днищ при внешних статических нагрузках на штырь. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 46 с.

5. ГОСТ 34233.4-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 41 с.

6. ГОСТ 34233.5-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечайек и днищ от воздействия опорных нагрузок. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 41 с.

7. ГОСТ 34233.6-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоскоростных нагрузках. – Введ. 2018-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 24 с

8. GOST 34233.7-2017 Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost. Teploobmennyye apparaty. – Vved. 2018-08-01. – Moskva : Standartinform, 2018. – 53 s.
9. GOST 34233.8-2017 Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost. Sosudy i apparaty s rubashkami. – Vved. 2018-08-01. – Moskva : Standartinform, 2018. – 27 s.
10. GOST 34233.9-2017 Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost. Apparaty kolonnogo tipa. – Vved. 2018-08-01. – Moskva : Standartinform, 2018. – 23 s.
11. GOST 34233.10-2017 Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost. Sosudy i apparaty, rabotayushchiye s serovodorodnymi sredami. – Vved. 2018-08-01. – Moskva : Standartinform, 2018. – 5 s.
12. GOST 34233.11-2017 Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost. Metod rascheta na prochnost obechayek i dnishch s uchedom smeshcheniya kromok svarnykh soyedineniy, uglovatosti i nekruglosti obechayek. – Vved. 2018-08-01. – Moskva : Standartinform, 2018. – 16 s.
13. GOST 34233.12-2017 Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost. Trebovaniya k forme predstavleniya raschetov na prochnost, vypolnyayemykh na EVM. – Vved. 2018-08-01. – Moskva : Standartinform, 2018. – 4 s.
14. Pikul, V. V. Sovremennyye problemy nauki v oblasti prikladnoy mekhaniki : uchebnyk : v 2 ch. / V. V. Pikul. – Vladivostok : Izd-vo DVGUTU, 2003–2005.
CH. 1 : Mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela. – 2003. – 263 s.
CH. 2 : Mekhanika obolochek. – 2005. – 524 s.
15. Tsyganskaya, L. V. O prichinakh deformatsii obechayki kotlov vagonov-tsistern dlya vyazkikh nefteproduktov / L. V. Tsyganskaya, D. G. Beyn, N. A. Atamanchuk // Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy. – 2024. – № 4 / Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, AO «NVTs «Vagony». – Sankt-Peterburg, 2024. – S. 24–39.
16. Pravila perevozok zhidkikh грузов nalive v vagonakh tsisternakh i vagonakh bunkernogo tipa dlya perevozki neftebituma: utv. na pyatidesyatom zasedanii Soveta po zheleznodorozh. transportu 22.05.2009 g. / otv. za vyp. V.A. Aleksandrovich. – Minsk: Tesey, 2009. – 96 s.

Brylova Tatyana Borisovna

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Omsk State Transport University, Omsk
Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities
644046, Omsk, Karl Marx Avenue, Building 35
E-mail: biser65@mail.ru

Grits Dmitry Borisovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Omsk State Transport University, Omsk
Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities
644046, Omsk, Karl Marx Avenue, Building 35
E-mail: gritstmdm@mail.ru

Kondratenko Evgeny Vladimirovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Omsk State Transport University, Omsk
Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities
644046, Omsk, Karl Marx Avenue, Building 35
E-mail: kondratenkoev@list.ru

Fomenko Valentin Konstantinovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Omsk State Transport University, Omsk
Associate Professor of the Department of Locomotives
644046, Omsk, Karl Marx Avenue, Building 35
E-mail: fomenkovk@mail.ru

© Брылова Т.Б., Гриц Д.Б., Кондратенко Е.В., Фоменко В.К., 2026

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 669.58

DOI: 10.33979/2073-7408-2026-376-2-28-35

КАРФИДОВ А.О., ГОРБАТЮК С.М., ИБРАГИМОВА А.А.

СРАВНЕНИЕ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕРМОДИФфуЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены основные типы установок для термодиффузионного цинкования (ТДЦ) металлических изделий, сравниваются их конструктивные особенности, рабочие параметры, преимущества и недостатки. Проведен анализ оборудования российских и зарубежных производителей с учетом производительности, уровня автоматизации, энергоэффективности, требований к качеству покрытия и сервисной поддержки. Описаны этапы технологического процесса ТДЦ, приведены критерии и практические рекомендации по выбору установок в зависимости от объема и специфики производства. В работе отмечается, что классические барабанные установки остаются оптимальными для стандартных задач и небольших объемов, а индукционные установки обеспечивают лучшие защитные свойства покрытия, но требуют больших инвестиций. Представлен обзор ведущих компаний отрасли, выявлены различия подходов к организации производства и интеграции оборудования. Сделан вывод о необходимости комплексного подхода при выборе оборудования для локализации процесса ТДЦ.

Ключевые слова: термодиффузионное цинкование, антикоррозионная защита, установки термодиффузионные, индукционные печи, российские и зарубежные производители, сравнение оборудования, энергоэффективность.

Введение

Термодиффузионное цинкование (ТДЦ) – это современный способ нанесения цинкового покрытия на металлические изделия с целью повышения их коррозионной стойкости и долговечности. Метод широко применяется в промышленности для обработки деталей из стали, в том числе стандартных крепежных изделий и профилей размером по одной из сторон 30 – 40 мм, длиной до 1200 мм, толщиной материала 3 – 10 мм [1]. Локализация процесса на собственном производстве требует грамотного выбора оборудования, соответствующего техническим и экономическим требованиям [1].

Принцип работы и особенности процесса ТДЦ

Термодиффузионное цинкование основано на диффузии атомарного цинка в структуру стали при высоких температурах (300 – 450 °С), что приводит к формированию прочного интерметаллического слоя железо-цинк [3, 4, 6]. Оборудование для ТДЦ включает герметичные реторты, нагревательные элементы, системы автоматического управления температурой и времени выдержки, а также устройства для пассивации и контроля толщины покрытия [2, 4, 6].

Основные этапы процесса [4, 6]:

- предварительная очистка и обезжиривание деталей;
- загрузка в реторту с цинкосодержащей смесью;
- нагрев и выдержка при заданной температуре;
- охлаждение, удаление остатков смеси и пассивация.

Виды установок для ТДЦ

Классические установки

Наиболее распространены печи барабанного типа с герметично закрывающейся крышкой и вращающейся ретортой. Внутри происходит равномерное распределение цинкосодержащей смеси и изделий, что обеспечивает однородность покрытия [5].

Индукционные установки (ТДЦЭ)

Современные индукционные установки используют электромагнитное поле промышленной частоты для ускорения процесса диффузии и повышения качества слоя [7]. Такие установки позволяют точнее контролировать параметры процесса и получать покрытия с улучшенными защитными свойствами.

Критерии сравнения установок

В таблице 1 приведены критерии сравнения установок с нагревательными элементами и установок, осуществляющих нагрев за счет электромагнитной индукции.

Таблица 1 – Типы установок

Критерий	Классические печи барабанного типа	Индукционные установки (ТДЦЭ)
Габаритные размеры	Средние, зависят от объема реторты (до 600 кг)	Компактнее при той же загрузке
Толщина цинкового слоя	5 – 120 мкм	30 – 80 мкм, более однородный слой
Потребляемая мощность	20 – 60 кВт (зависит от объема и типа печи)	15–40 кВт, выше энергоэффективность
Время обработки	1,5 – 3 часа	1–2 часа
Стоимость оборудования	От 2 до 10 млн. руб. (в зависимости от объема)	От 3 до 12 млн. руб., выше за счет автоматики
Автоматизация	Средняя, ручная загрузка/выгрузка	Высокая, автоматизированный контроль
Качество покрытия	Хорошее, возможны неравномерности	Высокое, минимальные дефекты
Безопасность	Требует контроля герметичности и вентиляции	Повышенные требования к электробезопасности
Преимущества	Простота конструкции, надежность, возможность обработки крупных партий изделий, невысокая стоимость обслуживания.	Высокая однородность и качество покрытия, сокращение времени обработки, энергоэффективность, автоматизация процесса
Недостатки	Более высокое энергопотребление, менее точный контроль параметров, возможна неравномерность покрытия при сложной геометрии изделий [5, 6]	Более высокая стоимость, сложность обслуживания, повышенные требования к квалификации персонала [7]

Рекомендации по выбору установки

Для локализации процесса ТДЦ на собственном производстве при обработке деталей из стали Ст3 и стандартных крепежных изделий рекомендуется ориентироваться на следующие параметры:

- объем загрузки реторты не менее 100 – 200 кг для обеспечения производительности;
- возможность обработки профилей длиной до 1200 мм;
- автоматизация контроля температуры и времени выдержки;
- наличие систем пассивации и контроля толщины цинкового слоя;
- соответствие требованиям по энергоэффективности и безопасности.

Выбор между классической и индукционной установкой зависит от приоритетов: если важна максимальная производительность при умеренных затратах оптимальны классические печи; если основной критерий качество покрытия и автоматизация, стоит рассмотреть индукционные установки.

Вывод

Сравнительный анализ показал, что обе группы установок способны обеспечить высокое качество цинкового покрытия для деталей и узлов заданных размеров. Индукционные установки выигрывают по энергоэффективности и качеству, однако требуют больших инвестиций. Классические печи остаются востребованными благодаря надежности и простоте

эксплуатации. Окончательный выбор оборудования должен основываться на анализе производственных задач, объема выпуска и требований к характеристикам покрытия [5, 7].

Примеры российских и зарубежных производителей установок для термодиффузионного цинкования

Российские производители

ООО «Дистек-Урал» (г. Екатеринбург) – один из лидеров российского рынка оборудования для термодиффузионного цинкования, осуществляет поставки установок различной производительности и модификаций [12].

ООО «НЗОМ» (Московская область, Домодедово) – производит печи любых характеристик по ТЗ заказчика от 3 млн. руб. [15].

ТЕРМИТ СПб (г. Санкт-Петербург) – предлагает изготовление и поставку агрегатов для ТДЦ [5]

ООО «Цинк-ТЗ» (г. Брянск) – специализируется на выполнении работ по термодиффузионному цинкованию пробует себя в производстве оборудования [9].

Завод «Станфер» – крупный российский производитель, обладающий собственным производством и опытом в сфере ТДЦ [3].

ООО «ЭЛПРОММАШ» (Саратов-Цинк) – выпускает установки с загрузкой до 500 кг, полуавтоматическим управлением и возможностью адаптации под требования заказчика [11].

Губкинский университет предлагает услуги по разработки технологии, компоновки участка, проектированию и изготовлению оборудования ТДЦ [8].

ООО «ПрофЦинк» производит установки для ТДЦ с рабочим диаметром до 820 мм [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

ООО «СоюзПромЗащита» (г. Челябинск) [10] – изготавливает оборудование с применением современных высокотехнологичных утеплительных материалов, что позволяет существенно снизить энергозатраты на обрабатываемую продукцию.

ООО «Электромеханика» (г. Москва), МИРМЕТ (Московская обл.), МеталлЭнергоХолдинг (г. Уфа), Завод металлоизделий «ТДЦ» (г. Сосновый Бор, Ленинградской обл), ООО «Завод Спецсталь» (г. Санкт-Петербург), Группа компаний Евразия (г. Санкт-Петербург) [17] – предоставляют услуги по нанесению цинкового покрытий методом термодиффузионного цинкования

ПСК Инжиниринг (г. Екатеринбург) изготавливает металлоконструкции с применением ТДЦ.

Зарубежные производители

General Galvanizing (США) – предлагает широкий спектр промышленных решений для цинкования, включая комплексные автоматизированные линии и установки для крупных производств.

Western Technologies Inc. (Westech, США) – международная компания, проектирующая и поставляющая комплексные заводы и отдельные установки для горячего и термодиффузионного цинкования по всему миру [14].

REMIX SA (Польша) – производитель и поставщик комплектных линий для нанесения антикоррозионных покрытий методом цинкования, включая оборудование для термодиффузионного цинкования [14].

ITACOR S.r.l. (Италия) – проектирует, изготавливает и внедряет промышленные линии для горячего и термодиффузионного цинкования металлоизделий [14].

Эти компании обладают значительным опытом и могут предложить решения для локализации процесса термодиффузионного цинкования на собственном производстве.

Отличия установок российских и зарубежных производителей для термодиффузионного цинкования

Выбор оборудования для термодиффузионного цинкования (ТДЦ) – стратегически важное решение для локализации процесса на собственном производстве. Ориентироваться стоит не только на цену, но и на технические, эксплуатационные и сервисные параметры. Ниже в таблице 2 приведены ключевые критерии и рекомендации для выбора между российскими и зарубежными установками.

Таблица 2 – Ключевые критерии

Характеристика	Российские установки	Зарубежные установки
Технологии нагрева	Преимущественно электрические и газовые печи, стандартные реторты [12]. Индукционные решения встречаются реже, но появляются у ведущих производителей.	Более широкий спектр: электрические, газовые, активно внедряются индукционные технологии, что повышает энергоэффективность и сокращает время обработки [16].
Производительность	От 50 до 1000 кг/час (например, «Дистек 125», «Дистек 450») [12]. Модульность и адаптация под нужды заказчика, но крупные линии встречаются реже.	Линии на 500 – 2000 кг/час и выше, чаще предлагаются комплексные решения для крупных предприятий, возможна интеграция с автоматизированными линиями [16].
Габаритные размеры	Компактные и средние, оптимизированы под типовые задачи российского рынка; возможна индивидуальная доработка.	Часто более крупные, рассчитаны на большие объемы и интеграцию в автоматизированные цеха.
Толщина покрытия	Управляемая, обычно 5 – 150 мкм, высокая равномерность покрытия даже на сложных деталях [12, 3, 18].	Схожие диапазоны (15 – 150 мкм), но благодаря современным системам контроля обеспечивается более стабильная повторяемость параметров по всей партии.
Энергоэффективность	Стандартные установки расходуют 300 – 400 кВт·ч на 1 т изделий; индукционные – ниже, но пока не так распространены.	Индукционные линии позволяют существенно снизить энергозатраты, быстрее выходят на рабочий режим и обеспечивают равномерный прогрев [16].
Автоматизация	В основном полуавтоматические решения, ручная загрузка/выгрузка, автоматизация процесса контроля температуры и времени.	Высокий уровень автоматизации: автоматическая загрузка, выгрузка, интеграция с ERP-системами, дистанционный мониторинг [16].
Стоимость	Ниже зарубежных аналогов, удельная стоимость линии 25 000 – 60 000 руб. за 1 кг изделий/час производительности.	Выше, но оправдана за счет энергоэффективности, автоматизации и производительности.
Соответствие стандартам	ГОСТ Р 9.316-2006, санитарно-эпидемиологические заключения, экологичность [12].	Соответствие международным стандартам ISO, DIN, ASTM; часто выше требования к экологичности и безопасности.
Сервис и поддержка	Быстрая локальная поддержка, наличие запасных частей, обучение персонала на русском языке [12].	Поддержка на английском, немецком, итальянском языках, возможны задержки с поставками и сервисом.

Краткие выводы

Российские установки ориентированы на доступность, простоту обслуживания, адаптацию под местные условия и задачи малого/среднего производства.

Зарубежные производители делают акцент на энергоэффективности, высокой степени автоматизации, комплексных решениях для крупных производств и внедрении современных технологий нагрева (индукция) [16].

Качество покрытия и коррозионная стойкость сопоставимы, но зарубежные установки чаще обеспечивают более стабильную повторяемость параметров на крупных партиях изделий.

Стоимость российских решений ниже, а сервис и поддержка осуществляются быстрее за счет локализации производства и складов запчастей.

Эти различия важно учитывать при выборе оборудования для локализации процесса термодиффузионного цинкования на собственном.

Выбор между российским и иностранным оборудованием для термодиффузионного цинкования

Выбор оборудования для термодиффузионного цинкования (ТДЦ) – стратегически важное решение для локализации процесса на собственном производстве. Ориентироваться стоит не только на цену, но и на технические, эксплуатационные и сервисные параметры. Вот ключевые критерии и рекомендации для выбора между российскими и зарубежными установками:

Технические параметры и производительность

Российское оборудование часто рассчитано на типовые задачи отечественного рынка: партии изделий средней и малой массы, стандартные профили, крепеж, детали из стали Ст3 и аналогов.

Зарубежные установки обычно предлагают более широкий диапазон производительности, модульность, интеграцию в автоматизированные линии, а также передовые технологии (индукционный нагрев, автоматический контроль параметров).

Рекомендация:

Если ваши объемы производства средние или небольшие, а ассортимент изделий стандартный – российские установки могут быть оптимальны по соотношению цена/качество. Для высокопроизводительных линий, сложной автоматизации и максимальной повторяемости параметров имеет смысл рассмотреть зарубежные решения.

Качество покрытия и стабильность процесса

Российские производители обеспечивают достойное качество покрытия, соответствующее ГОСТ, с хорошей равномерностью слоя (5 – 150 мкм). Однако автоматизация и повторяемость параметров могут уступать западным аналогам.

Иностранные производители гарантируют стабильность, автоматический контроль толщины слоя, минимизацию человеческого фактора и дефектов.

Рекомендация:

Для ответственных изделий, где важна стабильность и однородность покрытия на больших партиях, лучше выбирать зарубежные линии. Для стандартных задач и небольших объемов российское оборудование справится отлично.

Автоматизация и интеграция

Российские установки в основном полуавтоматические: ручная загрузка/выгрузка, автоматизация только основных процессов.

Зарубежные установки предлагают высокий уровень автоматизации: автоматическая загрузка, выгрузка, интеграция с ERP-системами, дистанционный мониторинг.

Рекомендация:

Если планируется интеграция в современные производственные линии, минимизация ручного труда и цифровизация – стоит рассмотреть зарубежные решения.

Стоимость и окупаемость

Российское оборудование дешевле в закупке и обслуживании, быстрее окупается на малых и средних объемах.

Иностранное оборудование дороже, но потенциально экономит на энергозатратах, персонале и браке при больших объемах.

Рекомендация:

Оцените общий объем инвестиций, срок окупаемости и посчитайте TCO (total cost of ownership) – возможно, российская линия будет выгоднее при ограниченном бюджете.

Сервис, поддержка и запчасти

Российские производители обеспечивают оперативный сервис, обучение на русском языке, быстрое снабжение запчастями.

Зарубежные производители могут сталкиваться с задержками поставок, языковыми барьерами, более высокой стоимостью сервиса.

Рекомендация:

Если важна быстрая поддержка и минимальные простои, российское оборудование предпочтительнее.

Соответствие стандартам и требованиям

Российские установки соответствуют ГОСТ и санитарным нормам РФ.

Зарубежные установки соответствуют международным стандартам ISO, DIN, ASTM, часто более экологичны и энергоэффективны.

Рекомендация:

Если вы работаете на экспорт или под международные требования – обратите внимание на зарубежные линии.

Итоговая таблица сравнения

Таблица 3 – Итоги сравнения

Критерий	Российское оборудование	Зарубежное оборудование
Цена	Ниже	Выше
Качество покрытия	Хорошее, соответствует ГОСТ	Очень высокое, стабильная повторяемость
Автоматизация	Средняя, полуавтомат	Высокая, полная автоматизация
Сервис и поддержка	Быстро, на русском языке	Дольше, на иностранном языке
Энергоэффективность	Стандартная	Выше, современные технологии
Интеграция	Ограничена	Широкие возможности
Соответствие стандартам	ГОСТ	ISO, DIN, ASTM
Окупаемость	Быстрее на малых и средних объемах	Быстрее на больших объемах

Практические советы по выбору

Определите свои производственные задачи: объем, ассортимент, требования к покрытию.

Сравните стоимость владения (ТСО): учтите не только цену покупки, но и эксплуатационные расходы, сервис, простои.

Оцените возможности автоматизации: если важна интеграция с цифровыми системами – выбирайте зарубежное оборудование.

Учитывайте сервис и поддержку: для бесперебойной работы на старте лучше выбрать российского поставщика.

Проверьте соответствие стандартам: если требуется экспорт или работа по международным нормам ориентируйтесь на зарубежные линии.

Как получить индивидуальное коммерческое предложение

Сформулировать техническое задание (можно использовать ваш файл ТЗ, переведя его на английский язык).

Отправить запрос на электронную почту export@huahengzinc.com или через форму обратной связи на сайте.

Указать ключевые параметры:

Производительность (кг/час)

Максимальные размеры изделий

Тип нагрева (электрический/ индукционный)

Требования по автоматизации

Наличие системы пассивации

Требования по стандартам (ГОСТ, ISO и др.)

Место установки (город, страна)

Запросить расчет стоимости доставки, монтажа и обучения персонала.

Заключение

Для стандартных задач и ограниченного бюджета оптимально выбрать российское оборудование. Для высоких требований к автоматизации, энергоэффективности и стабильности процесса – зарубежные установки, особенно если планируется масштабирование или экспорт продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карфидов, А.О., Горбатюк, С.М. Ибрагимова, А.А. Обзор современных методов защиты от коррозии цинкованием // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 2(370) – С. 34 – 45.
2. Особенности процесса термодиффузии: достоинства, применение [Электронный ресурс] // Компания. URL: <https://t-zinc.ru/tremodifuziya/osobennosti-processa-termodiffuzii.html>
3. Технология термодиффузионного цинкования – Станфер [Электронный ресурс] // Компания. URL: <https://stanfer.ru/technology/>
4. Термодиффузионное цинкование металла [Электронный ресурс] // Компания. URL: <https://zavod-kmk.ru/info/termodiffuzionnoe-cinkovanie-metalla>
5. Изготовление и поставка установок для термодиффузионного цинкования [Электронный ресурс] // Компания. URL: <http://termit-spb.ru/uslugi/izgotovlenie-i-postavka-ustanovok-dlya-tdts/>
6. Термическое диффузионное цинкование [Электронный ресурс] // Компания. URL: <https://vt-metall.ru/articles/termodiffuzionnoe-cinkovanie/>
7. Термоцинкование в электромагнитном поле (ТДЦЭ) [Электронный ресурс] // Компания. URL: <https://okorrozii.com/termodiffuzionnoe-tsinkovanie-v-elektromagnitnom-pole-tdtse>
8. О компании [Электронный ресурс] // Компания. URL: <https://zinkt.orgs.biz/#about>
9. Динамическое термодиффузионное цинкование [Электронный ресурс] // Компания. URL: https://gubkin.ru/science/nauchnaya-infrastruktura/institutes_and_centers/Uchebn_nauch_proizv_centra_po_remontu/dinamicheskoe-termodiffuzionnoe-tsinkovanie.php?clear_cache=Y
10. Оборудование для термодиффузионного цинкования ZINC R1500 [Электронный ресурс] // Компания. URL: https://www.spzinc.ru/Oborudovanye_tdz/ZINC_R1500/
11. Установка термодиффузионного цинкования ТДУ <https://xn--80akrri9d.xn--p1ai/TDU.html>
12. Цинкование металла [Электронный ресурс] // Компания. URL: <https://distek-ural.ru/czinkovanie-msk/>
13. Производство термодиффузионного цинкования [Электронный ресурс] // Компания. URL: <http://www.emech-emech.ru/proizvodstvo>
14. Партнёры компании ZDC [Электронный ресурс] // Компания. URL: <https://zdc.ru/partners/>
15. Печи для термодиффузионного цинкования [Электронный ресурс] // Компания. URL: https://nzom.ru/pech_tdc
16. Константинов В.М., Булойчик И.А., Анализ технологий термодиффузионного цинкования с применением индукционного нагрева в порошковых насыщающих средах. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/29853/Analiz_tekhnologij_termodiffuzionnogo_cinkovaniya_s_primeneniem_indukcionnogo_nagreva_v_poroshkovyh_nasyshchayushchih_sredah.pdf?sequence=1&isAllowed=y
17. Термодиффузионное покрытие крепежа (ТДЦЗ) [Электронный ресурс] // Компания. URL: <https://eurasiakrep.ru/articles/termodiffuzionnoe-tdcz-pokryitie-krepezh/>
18. Галин Р.Г., Дема Р.Р., Звягина Е.Ю. Диффузное цинкование сталей в нанокристаллизованных порошках цинка с предварительной пластической деформацией, [Электронный ресурс] // Материаловедение и металлургия в машиностроении. URL: http://www.rep.vstu.by/bitstream/handle/123456789/9210/PM_1_280-294.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Карфидов Алексей Олегович
Национальный
исследовательский
технологический университет
"МИСиС", г. Москва
Заведующий кафедрой
инжиниринга технологического
оборудования
119049, г. Москва, Россия,
E-mail: a.korf@mail.ru

Горбатюк Сергей Михайлович
Национальный исследовательский
технологический университет
"МИСиС", г. Москва
Доктор технических наук,
профессор кафедры инжиниринга
технологического оборудования
119049, г. Москва, Россия,
E-mail: sgor02@mail.ru

Ибрагимова Алёна Александровна
Национальный исследовательский
технологический университет
"МИСиС", г. Москва
Аспирант кафедры инжиниринга
технологического оборудования
119049, г. Москва, Россия,
E-mail: m2201160@edu.misis.ru

KARFIDOV A.O., GORBATYUK S.M., IBRAGIMOVA A.A.

COMPARISON OF THERMAL DIFFUSION GALVANIZING PLANTS FROM DIFFERENT MANUFACTURERS

Abstract. The article discusses the main types of installations for thermal diffusion galvanizing (TDG) of metal

products, compares their design features, operating parameters, advantages and disadvantages. The analysis of equipment from Russian and foreign manufacturers is carried out, taking into account productivity, automation level, energy efficiency, coating quality requirements and service support. The stages of the TDG technological process are described, criteria and practical recommendations for the selection of installations are given, depending on the volume and specifics of production. The paper notes that classical drum installations remain optimal for standard tasks and small volumes, while induction installations provide the best protective coating properties, but require large investments. An overview of the leading companies in the industry is presented, and differences in approaches to production organization and equipment integration are revealed. The conclusion is made about the need for an integrated approach when choosing equipment for localization of the TDG process.

Keywords: thermal diffusion galvanizing, anticorrosive protection, thermal diffusion installations, induction furnaces, Russian and foreign manufacturers, equipment comparison, energy efficiency.

BIBLIOGRAPHY

1. Karfidov, A.O., Gorbatyuk, S.M., Ibragimova, A.A. Review of modern corrosion protection methods by zinc coating // Fundamental and Applied Problems of Technology and Engineering. – 2025. – No. 2(370). – P. 34 – 45.
2. Features of the thermodiffusion process: advantages, applications [Electronic resource] // Company. URL: <https://t-zinc.ru/tremodifuziya/osobennosti-processa-termodiffuzii.html>.
3. Thermodiffusion zinc coating technology – Stanfer [Electronic resource] // Company. URL: <https://stanfer.ru/technology/>.
4. Thermodiffusion zinc coating of metal [Electronic resource] // Company. URL: <https://zavod-kmk.ru/info/termodiffuzionnoe-cinkovanie-metalla>.
5. Manufacturing and supply of thermodiffusion zinc coating installations [Electronic resource] // Company. URL: <http://termite-spb.ru/uslugi/izgotovlenie-i-postavka-ustanovok-dlya-tdts/>.
6. Thermodiffusion zinc coating [Electronic resource] // Company. URL: <https://vt-metall.ru/articles/termodiffuzionnoe-cinkovanie/>.
7. Thermozinc coating in electromagnetic field (TDTSE) [Electronic resource] // Company. URL: <https://okorrozii.com/termodiffuzionnoe-tsinkovanie-v-elektromagnitnom-pole-tdtse>.
8. About the company [Electronic resource] // Company. URL: <https://zinkt.orgs.biz/#about>.
9. Dynamic thermodiffusion zinc coating [Electronic resource] // Company. URL: https://gubkin.ru/science/nauchnaya-infrastruktura/institutes_and_centers/Uchebn_nauch_proizv_centra_po_remontu/dinamicheskoe-termodiffuzionnoe-tsinkovanie.php?clear_cache=Y.
10. Equipment for thermodiffusion zinc coating ZINC R1500 [Electronic resource] // Company. URL: https://www.spzinc.ru/Oborudovanye_tdz/ZINC_R1500/.
11. Thermodiffusion zinc coating installation TDU [Electronic resource] // Company. URL: <https://xn--80akrri9d.xn--p1ai/TDU.html>.
12. Metal zinc coating [Electronic resource] // Company. URL: <https://distek-ural.ru/czinkovanie-msk/>.
13. Thermodiffusion zinc coating production [Electronic resource] // Company. URL: <http://www.emech-emech.ru/proizvodstvo>.
14. Partners of ZDC company [Electronic resource] // Company. URL: <https://zdc.ru/partners/>.
15. Furnaces for thermodiffusion zinc coating [Electronic resource] // Company. URL: https://nzom.ru/pech_tdc.
16. Konstantinov V.M., Buloychik I.A. Analysis of thermodiffusion zinc coating technologies using induction heating in powder saturating media [Electronic resource] // URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/29853/Analiz_tekhnologii_termodiffuzionnogo_cinkovaniya_s_primeneniem_indukcionnogo_nagrevaya_v_poroshkovyh_nasyshchayushchih_sredah.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
17. Thermodiffusion coating for fasteners (TDCZ) [Electronic resource] // Company. URL: <https://eurasiakrep.ru/articles/termodiffuzionnoe-tdcz-pokrytie-krepezh/>.
18. Galin R.G., Dema R.R., Zvyagina E.Yu. Diffusion zinc coating of steels in nanocrystallized zinc powders with preliminary plastic deformation [Electronic resource] // Materials Science and Metallurgy in Metallurgy and Mechanical Engineering. URL: http://www.rep.vstu.by/bitstream/handle/123456789/9210/PM_1_280-294.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Karfidov Alexey Olegovich

National University of Science and Technology «MISiS», Moscow
Head of the Department of Technological Equipment Engineering
119049, Moscow, Russia,
E-mail: a.korf@mail.ru

Gorbatyuk Sergey Mikhailovich

National University of Science and Technology «MISiS», Moscow
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technological Equipment Engineering
119049, Moscow, Russia,
E-mail: sgor02@mail.ru

Ibragimova Alena Alexandrovna

National University of Science and Technology «MISiS», Moscow
Postgraduate student of the Department of Technological Equipment Engineering
119049, Moscow, Russia,
E-mail: m2201160@edu.misis.ru

ГОЛЕНКОВ В.А., РАДЧЕНКО С.Ю., ДОРОХОВ Д.О.

ВОПРОСЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПО СТОЙКОСТИ ПРОТИВ ВОДОРОДНОЙ ХРУПКОСТИ ДЛЯ БЕСКИСЛОРОДНОЙ МЕДИ

Аннотация. На основе анализа нормативной документации на металлургическую продукцию из бескислородной меди, сделан вывод о сложности применения рекомендаций по контролю качества на стойкость против водородной хрупкости для данных материалов. Предложен организационный подход, исключающий разногласия при выходном контроле у производителя и входном у потребителя.

Ключевые слова: бескислородная медь, обработка металлов давлением, водородная хрупкость, контроль качества, полосы, ленты, прутки, металлографический контроль.

Введение.

Удаление оксидов в меди позволяет достичь максимально возможной для данного металла электропроводности, параллельно повышает теплопроводность, обрабатываемость давлением и улучшает качество сварных и паяных соединений. Обычная медь, полученная путем плавки в воздушной атмосфере, содержит заметное количество кислорода (сотые доли процента). Этот кислород взаимодействует с водородом (например, из атмосферы при последующем нагреве) и образует пары воды, которые не могут выйти из кристаллической решетки. Это приводит к дефектам - пузырькам, трещинам и ухудшению механических свойств. Данное явление называется «водородная болезнь». Поэтому, для нужд вакуумной, электронной, оптоэлектронной и других отраслей военного и гражданского приборостроения используют бескислородную медь, изготавливаемую специальными способами [1]. Отечественной металлургической промышленностью, системой ГОСТов и ТУ предусмотрены следующие марки рассматриваемого материала: М00б (кислорода не более 0,001%), М0б (кислорода не более 0,001%), М1б (кислорода не более 0,003%) по ГОСТ 859-2014 [2] и МВ (кислорода не более 0,001%), ММВ (кислорода не более 0,001%, дополнительно легирован иттрием 0,01-0,03%), МВА (кислорода не более 0,003%) по ТУ Яе0.021.038, Яе0.021.112. При этом кислород химическими методами определяется в [2] и по ТУ по ГОСТ 13938.13-93 [3]. Данная проверка в системе ГОСТов и ТУ Российской Федерации не отменяет требования на проверку по водородной хрупкости, на конечную продукцию – труб, прутков, полос, листов, лент и проволоки.

Основная часть.

ГОСТ 10988-2016 [4] для определения стойкости против водородной хрупкости предусматривает изготовления по одной пластинке толщиной 2 мм, шириной 10 мм, длиной не менее 100 мм для отобранных прутков. Если диаметр прутков менее 10,0 мм, то ширина пластинок должна соответствовать диаметру прутка. Это процедура предусматривает последующие испытания на перегиб согласно требованиям ГОСТ 24048-80 [5]. Если же выбран метод металлографического контроля по [5], то образцы быть вырезаны так, чтобы плоскость шлифа была параллельна направлению пластической деформации; одна из боковых сторон не должна подвергаться механической обработке [4].

В ГОСТ 15471-2014 [6] для определения стойкости против водородной хрупкости ленты вырезают образцы шириной 10 мм и длиной (100 +10) мм в направлении пластической деформации. Из полос толщиной более 2 мм образцы изготавливают холодной прокаткой или механической вырезкой в направлении деформации с конечными размерами 2х10х100(+10)мм [6]. Требования по подготовке образца для металлографии аналогично [4].

Для определения стойкости к водородной хрупкости для труб из бескислородной меди по ГОСТ 15040-2016 [7], изготавливают по одной пластинке толщиной 2 мм, шириной 10мм, длиной 80-100мм, а если толщина стенки менее 2мм, то выпиливают образцы из 1/4 окружности, но не шире 10мм, и толщиной, равной толщине стенки. Проволоку согласно, ТУ Яе0.021.112 проверяют методом перегиба и визуально, на наличие вздутий на образцах длиной 100-150мм.

В целом ГОСТы [4, 6, 7] сводятся и (или) описывают способы контроля приведенные в [5], в котором для испытаний на перегиб должны быть получены образцы толщиной 2мм, при этом допускается как их обработка резанием, так и холодная пластическая деформация с промежуточными отжигами. Если выбран метод металлографического контроля, то согласно рекомендациям [4-7], образцы должны быть вырезаны так, чтобы плоскость шлифа была перпендикулярна или параллельна (должно быть установлено в документации на продукцию) направлению пластической деформации. Далее образцы [5] подвергаются отжигу в среде водорода или инертного газа с добавлением не менее 10% водорода при температуре $850^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ (допускается температура до 950°C) с выдержкой 30мин и с последующим быстрым охлаждением в той же среде или в воде. В зависимости от типа подготовленного образца проводят испытание на перегиб в специальных устройствах или проводят наблюдения при двухсоткратном увеличении (необходимость травления образцов в [5] факультативна). В последнем случае образец, не должен иметь пор, трещин или нарушений границ зерен.

Рассматриваемые ГОСТы [4-7] имеют противоречия и неоднозначности:

- нет определённости в выборе метода контроля - металлографического или испытанием на перегиб, отсюда возможны противоречия между потребителем и производителем;
- сомнительно ожидать изготовление плоского образца толщиной в 2мм из прутка диаметра, например 120мм, или для трубы с толщиной стенки 7,5мм (на практике, из подобных изделий резанием изготавливают кольцевые образцы для последующей осадки и изучения характера излома);
- приведённая характеристика качества при металлографическом контроле в самом определении не носит числового измерения и существенно зависит от мнения испытателя, так как ГОСТ [5] не приводит графического изображения дефектов;
- допустим относительно широкий диапазон температур для проведения отжига в средах с водородом.

Поэтому, в ряде источников приведены предложения по изменению методики контроля. Например, в [8] прямо говорится: «...общепринятая методика контроля водородной хрупкости не обеспечивает достаточной достоверности результатов» и делается вывод, «...что наиболее эффективным способом для определения меди на водородную хрупкость является режим: проведение двух повторных отжигов в среде водорода при температуре 900°C в течение 30 минут каждый». Можно распространить предложение, описанное в [9], на контроль по водородной хрупкости – изготавливать и подготавливать образцы согласно рекомендациям Приложения Б [4]. Представляет интерес предложение, согласно [10]: «Из темплета слитка вырезают образцы таким образом, что ось образца составляет угол $15 \pm 5^{\circ}$ с продольной осью слитка. Полученные образцы отжигают в атмосфере водорода при $825-875^{\circ}\text{C}$ в течение 40 мин. Отожженные образцы нагружают растягивающим усилием до разрушения, затем определяют соответствующие значения предела прочности, или относительного удлинения». Критерием оценки является занижение приведенных механических параметров на 20-50%. В работе [11] «для повышения достоверности оценивания состояния бескислородной меди предлагается использовать электронный растровый микроскоп» и делается вывод, что только «сочетанием различных методов можно получить объективную оценку свойств бескислородной меди».

Приведенные источники [8-11] описывают различные подходы к рассматриваемой проблеме, зачастую трудозатратны и экономически нецелесообразны, а самое главное, в большей части выходят за рамки требований [4-7], поэтому могут быть использованы только конечными предприятиями потребителями для увеличения гарантий качества бескислородной меди. Большой практический интерес представляет выработка практических рекомендаций к интерпретации ГОСТа [5] и соответственно документов [4, 6, 7]. По мнению авторов наиболее рациональным выглядит следующий алгоритм контроля как у производителя, так и у потребителя.

Контролировать необходимо только финальный продукт, так как проникновение кислорода в материал при нарушении технологии производства возможно: вместе с шихтой, при несоответствующей выплавке, в ходе нагрева для горячей деформации, в процессе деформации и при отжиге.

В качестве базового следует использовать металлографический контроль, так подготовка образцов для испытаний на перегиб затруднительна, зачастую упрощается у потребителей и может привести к изменению внутренней структуры материала.

Образцы должны быть вырезаны из сечения перпендикулярного наибольшей длины металлургического изделия. Контроль всей площади сечения следует проводить если один из его размеров не превышает 50мм (см. рисунки 1 и 2), в противном случае:

- для осесимметричных изделий следует его разделить на сегменты и (или) сектора, таким образом, чтобы лаборанту металлографического контроля было удобно исследовать всю площадь шлифа;

- для плоского проката следует разделить на кратные части по ширине.

В случае лент толщиной менее 2мм, тонких труб и так далее необходимо использовать специальные приспособления, удерживающие образцы при запрессовке (см. рисунок 1). Для тонких лент (менее 0,1мм) и фольги для анализа следует вырезать квадратные образцы, размером удобным для запрессовки, при этом контролируемой частью должна являться поверхность проката.

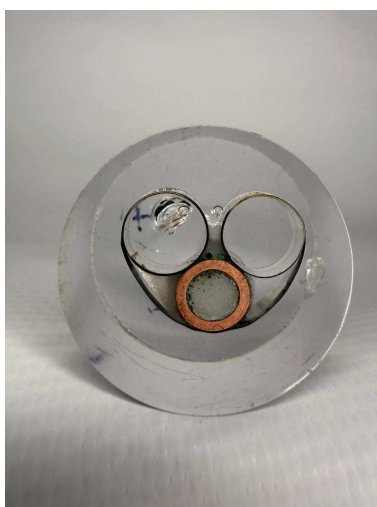


Рисунок 1 – Дефектный образец трубки М06 размером 8х1мм после водородного отжига



Рисунок 2 – Дефектный образец прутка М06 диаметром 50мм после водородного отжига

Термическую обработку следует проводить в отдельной печи, при этом укладку образцов производить в холодную печь, далее производить продувку и наполнение водородом или его смесью и включать нагрев. Температура строго 850°C, с максимальной доступной точностью, при произвольной скорости нагрева, выдержка при данной температуре в течении 30мин, остывание вместе с печью в водородной среде. Выемку образцов начинать производить при температуре не выше 150°C. Такой подход гарантирует насыщение образцов водородом и вступление его в возможную реакцию с кислородом в материале.

Далее образцы, в случае малого размера запрессовываются, полученные заготовки шлифуются и в обязательном порядке протравливаются. Исследования проводятся при увеличении $\times 200$ с обязательной фиксацией размеров дефектов (см. рисунки 3-4). Для процедуры может быть рекомендован п.3.2 ГОСТа [3]. В ГОСТе [5] не приведены фотографии дефектных образцов, поэтому можно рекомендовать в качестве примеров эталоны 1-9 на стр. 10-18 ГОСТа [3].

В целом, наиболее характерные виды дефектов представлены на рисунках 3 и 4. Дефекты на рисунке 3 носят точеный характер и выпадают по границам зерен, при этом границы зерен более ярко выражены благодаря последовательному скоплению дефектов. Характерный минимальный размер (диаметр несоответствия) для отнесения к дефекту следует принимать равным 4мкм (для примера, на рисунке 3 выделены размеры 4,05мм и 6,48мкм) при количестве более 10 в исследуемом поле. На рисунке 4 представлен дефект в виде утолщения по границам зерен. Для признания несоответствия следует принимать во внимание его

протяжённость (должен распространяться более чем на одно зерно) и утолщенные границы должны явно выделяться по сравнению с основной бездефектной структурой. Численная характеристика может быть установлена по аналогии – ширина утолщённой границы не менее 4мкм (для примера, на рисунке 4 выделены размеры 6,39мкм и 6,71мкм).

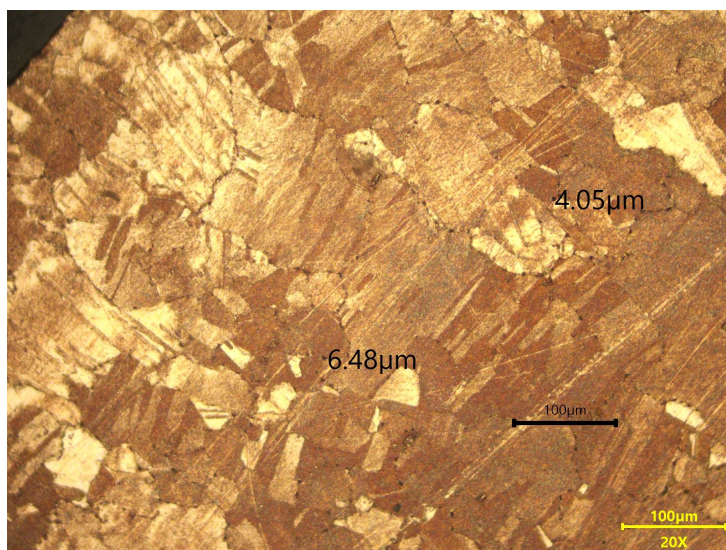


Рисунок 3 – Точечные дефекты в образце на рисунке 1

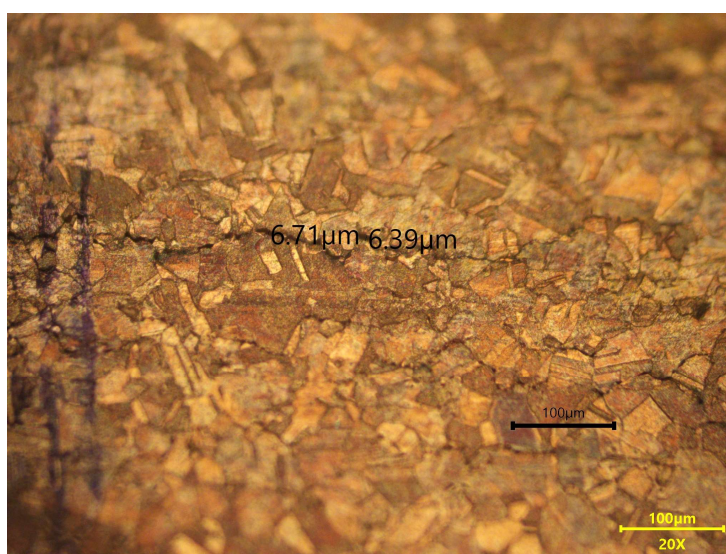


Рисунок 4 – Утолщение границам зерен образце на рисунке 2

Приведённый алгоритм действий в отличии от предложений в [8-11] не противоречит требованиям нормативной документации на прутки, полосы, листы, ленты, трубы и проволоку из бескислородной меди. Следуя описанному предложению, при его принятии у потребителя и производителя, организации будут использовать четко описанную методику в рамках принятой и работающей системы ГОСТов без их пересмотра.

Заключение.

Путем анализа нормативной документации на металлургическую продукцию (прутки, полосы, листы, ленты, трубы и проволоку из бескислородной меди) показана сложность и разносторонность подходов к контролю качества на стойкость против водородной хрупкости. Проанализированы источники [8-11], в которых отмечается неоднозначность подходов описанных в рамках системы ГОСТов [4-7] и делаются предложения по совершенствованию методик испытаний на водородную хрупкость. В противовес данным подходам предложен

организационный подход в виде алгоритма действий, исключая разногласия при выходном контроле у производителя и входном у потребителя и полностью соответствующий требованиям нормативной документации для полуфабрикатов из бескислородной меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов, К. Г. Металлургические особенности выплавки бескислородной меди в индукционных печах / К. Г. Семенов, В. В. Чернов, С. В. Колосков // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – № 5(8). – С. 170-177. – EDN XHXNZ.
2. ГОСТ 859-2014. Медь. Марки: взамен ГОСТ 859-204: дата введения 2015-07-01. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2025. 6 с.
3. ГОСТ 13938.13-93. Медь. Методы определения кислорода: взамен ГОСТ 13938.13-7: дата введения 1995-07-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 1995. 21 с.
4. ГОСТ 10988-2016. Прутки из бескислородной меди для электровакуумной промышленности. Технические условия: взамен ГОСТ 10988-75: дата введения 2017-04-01. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2017. 11 с.
5. ГОСТ 24048-80. Медь. Методы определения стойкости против водородной хрупкости: введен впервые: дата введения 1980-07-01. М.: Издательство стандартов, 1980. 5 с.
6. ГОСТ 15471-2014. Полосы и ленты из бескислородной меди для электронной техники. Технические условия: взамен ГОСТ 15471-77: дата введения 2015-09-01. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2015. 9 с.
7. ГОСТ 15040-2016. Трубы из бескислородной меди. Технические условия: взамен ГОСТ 15040-77: дата введения 2017-04-01. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2017. 19 с.
8. Рыжов, А. А. Определение дефектов бескислородной меди / А. А. Рыжов, Д. В. Дерябин, А. В. Шульгин // Материаловедческие, технологические проблемы и направления развития пассивных электронных компонентов и фотоэлектрических и оптоэлектронных приборов ИК диапазона : Материалы II научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, Санкт-Петербург, 15–16 мая 2018 года. – Санкт-Петербург: Типография "СИНЭЛ", 2018. – С. 32-33. – EDN XMSJFB.
9. Головкин, П. А. Влияние световых оттенков в материале прутков из бескислородной меди на его вакуумную плотность / П. А. Головкин // Перспективные машиностроительные технологии: сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и 5-летию Высшей школы машиностроения, Санкт-Петербург, 13–20 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – С. 298-304. – EDN ULDEEA.
10. Авторское свидетельство № 834447 А1 СССР, МПК G01N 3/28. Способ контроля качества бескислородной меди : № 2374424 : заявл. 21.06.1976 : опубл. 30.05.1981 / М. М. Дорофеев, Л. М. Грабарник, В. Г. Осинцев [и др.]. – EDN KWSKSE.
11. Алимова, Е. А. Анализ водородной хрупкости промышленных образцов меди методом растровой электронной микроскопии / Е. А. Алимова, И. А. Аверин // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2020. – Т. 1. – С. 254-257. – EDN HUTTRG.

Радченко Сергей Юрьевич
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.
Тургенева», г. Орел
Доктор технических наук,
профессор, и.о. проректора по
научной работе и международной
деятельности
302020, г. Орел, Наугорское
шоссе, 29
Тел. +7(4862)47–50–71
E-mail: radsu@rambler.ru

Голенков Вячеслав Александрович
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.
Тургенева», г. Орел
Доктор технических наук,
профессор,
руководитель научной школы
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. +7(4862)43–26–06
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
Тел. +79102084402
E-mail: ddostu@mail.ru

GOLENKOV V.A., RADCHENKO S.Y., DOROHOV D.O.

QUALITY CONTROL ISSUES FOR HYDROGEN FRAGILITY RESISTANCE IN OXYGEN-FREE COPPER

Annotation. Based on the analysis of regulatory documentation for oxygen-free copper metallurgical products, it was concluded that it is difficult to apply quality control recommendations for resistance to hydrogen embrittlement for these materials. An organizational approach is proposed that eliminates disagreements during output control at the manufacturer and input control at the consumer.

Keywords: *oxygen-free copper, metal forming, hydrogen embrittlement, quality control, strips, tapes, rods, and metallographic control.*

BIBLIOGRAPHY

1. Semenov, K. G. Metallurgical Features of Oxygen-Free Copper Smelting in Induction Furnaces / K. G. Semenov, V. V. Chernov, S. V. Koloskov // *Modern Materials, Techniques, and Technologies*. – 2016. – No. 5(8). – Pp. 170-177. – EDN XIHXNZ.
2. GOST 859-2014. Copper. Brands: instead of GOST 859-204: date of introduction 2015-07-01. M.: FSUE "STANDARTINFORM", 2025. 6 p.
3. GOST 13938.13-93. Copper. Methods for determination of oxygen: instead of GOST 13938.13-7: date of introduction 1995-07-01. M.: IPC Publishing House of Standards, 1995. 21 p.
4. GOST 10988-2016. Oxygen-free copper rods for the vacuum-tube industry. Technical conditions: instead of GOST 10988-75: date of introduction 2017-04-01. Moscow: FSUE STANDARDINFORM, 2017. 11 p.
5. GOST 24048-80. Copper. Methods for Determining Resistance to Hydrogen Fracture: Introduced for the First Time: Date of Introduction 1980-07-01. Moscow: Publishing House of Standards, 1980. 5 p.
6. GOST 15471-2014. Strips and ribbons of oxygen-free copper for electronic equipment. Technical conditions: instead of GOST 15471-77: date of introduction 2015-09-01. Moscow: FSUE "STANDARTINFORM", 2015. 9 p.
7. GOST 15040-2016. Pipes of oxygen-free copper. Technical Specifications: взамен ГОСТ 15040-77: дата введения 2017-04-01. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2017. 19 p.
8. Ryzhov, A. A. Defects in Oxygen-Free Copper / A. A. Ryzhov, D. V. Deryabin, and A. V. Shulgin // *Materials Science, Technology, and Development of Passive Electronic Components and Photovoltaic and Optoelectronic Devices in the Infrared Range: Proceedings of the II Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists*, St. Petersburg, May 15–16, 2018. – St. Petersburg: SINEL Printing House, 2018. – Pp. 32-33. – EDN XMSJFB.
9. Golovkin, P. A. Influence of light shades in the material of oxygen-free copper rods on its vacuum density / P. A. Golovkin // *Perspective engineering technologies: collection of articles of the International scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great and the 5th anniversary of the Higher School of Mechanical Engineering*, St. Petersburg, May 13–20, 2024. – St. Petersburg: POLITEH-PRESS, 2024. – Pp. 298-304. – EDN ULDEEA.
10. Copyright certificate No. 834447 A1 of the USSR, IPC G01N 3/28. Method of quality control of oxygen-free copper : No. 2374424 : application 06/21/1976 : published 05/30/1981 / M. M. Dorofeev, L. M. Grabarnik, V. G. Osintsev [et al.]. - EDN KWSKSE.
11. Alimova, E. A. Analysis of Hydrogen Fragility of Industrial Copper Samples by Scanning Electron Microscopy / E. A. Alimova, I. A. Averin // *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. – 2020. – Vol. 1. – Pp. 254-257. – EDN HUTTRG.

Radchenko Sergey Yuryevich
«Orel State University named
After I.S. Turgenev», Orel
Ph.D., professor, Acting Vice-Rector
for Research and International
Activities
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7(4862)47–50–71
E-mail: radsu@rambler.ru

Golenkov Vyacheslav Aleksandrovich
«Orel State University named after I.S.
Turgenev», Orel
Ph.D., professor, head of scientific
school
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7(4862)43–26–06
E-mail: president@ostu.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

© Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., 2026

ЛЯСКИН А.С., ЕФРЕМОВ А.В., КАЗМИРУК Д.А.

ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТРАДИЦИОННОЙ РАБОЧЕЙ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В ЭЛЕКТРОННУЮ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. На примере двух кронштейнов различной сложности, в качестве исходной рабочей конструкторской документации на которые выступали фрагменты их чертежей, отсканированные в формате А4, проведен анализ возможности создания электронной конструкторской документации для изготовления деталей с применением аддитивных технологий. Описаны этапы проведения работ, проанализированы возможности программного обеспечения с точки зрения повышения точности и удобства создания электронных геометрических моделей, пригодных для 3D-печати. Представлена методика разработки на основе традиционной рабочей конструкторской документации электронной рабочей конструкторской документации, необходимой для изготовления деталей с применением аддитивных технологий, оценены временные затраты на разработку. Проанализирована трудоемкость создания такой документации с использованием специализированного программного обеспечения Autodesk AutoCAD и Siemens NX.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, рабочая конструкторская и технологическая документация, электронная модель детали, 3D-модель.

Введение

Развитие промышленного производства в современном мире не может обойтись без применения новых технологий. Их использование – не модный тренд, а необходимость, так как только так можно обеспечить выпуск относительно дешевой, качественной и надежной продукции. В ряде случаев новые технологии могут внести существенные улучшения даже в традиционное производство. Именно это свойственно для так называемых аддитивных технологий.

Аддитивные технологии (АТ), наряду с технологиями искусственного интеллекта, являются одними из бурно развивающихся. Согласно отчету компании Wohlers Associates 2025 [1], мировой рынок АТ демонстрирует стремительный рост. К 2034 г. его объем прогнозируется на уровне 145,2 млрд. долларов – рост в 6,6 раз по сравнению с 2024 г. Руководители производств успели оценить преимущества АТ по сравнению с традиционными технологиями, основными из которых являются:

1. Уникальные характеристики получаемой продукции. Послойное выращивание позволяет получить изделие с улучшенными свойствами. В качестве примера можно привести изделия, которые получают путем 3D-печати металлами. По своим характеристикам и качеству такие детали оказались намного лучше, чем их аналоги, создаваемые по традиционным технологиям: литья или формовки.

2. Значительная экономия сырья и низкая себестоимость. Традиционные методы производства часто очень затратны, а потери сырья могут достигать 80% и даже больше. В отличие от традиционных технологий аддитивные намного более экономичны, так как программное обеспечение оборудования точно рассчитывает количество потребляемого сырья.

3. АТ позволяют выпускать изделия со сложной геометрией. Традиционные методы, например, литье или штамповка, не позволяют изготавливать очень сложные с точки зрения геометрии изделия. Если нужно получить, например, детали для систем охлаждения с сетчатой конструкцией, то традиционными способами этого не добиться. Зато промышленные 3D-принтеры позволяют выращивать модели практически любой степени сложности.

4. Мобильное производство и быстрый обмен данными. Аддитивные технологии используют компьютерные модели будущих изделий, которые можно за короткое время передать не только в разработку, но и переслать коллегам на другом конце мира. Это не требует наличия традиционных чертежей, габаритных моделей и т.п. Производство можно запускать в самые короткие сроки.

Благодаря указанным преимуществам, АТ нашли свое применение в полевом ремонте оборудования для изготовления деталей взамен вышедших из строя. В частности, в случаях,

когда длительное использование отечественного оборудования, например, станочного парка, приводило к невозможности его дальнейшего использования из-за износа и выхода из строя комплектующих деталей, серийное изготовление которых традиционными технологиями прекращено, а конструкторская документация на них существует и доступна только в виде калек чертежей со спецификациями.

Изготовление деталей и запасных частей взамен вышедших из строя с помощью 3D-печати, ввиду достоинств АТ, является наиболее предпочтительным, особенно, когда эти детали производятся в полевых ремонтных мастерских, удаленных от стационарного производства [2]. Однако в этом случае возникает необходимость разработки электронных геометрических моделей деталей для изготовления методами АТ по существующей рабочей конструкторской документации. Кроме того, при больших объемах замены вышедших из строя деталей на произведенные методом 3D-печати возникает задача оценки общей трудоемкости изготовления деталей в полевых условиях и, как следствие, принятия решения о целесообразности такого ремонта.

Таким образом, преобразование традиционной конструкторской документации (бумажных чертежей) в электронную для изготовления деталей с применением аддитивных технологий, а также оценка трудоемкости этапов такой работы, является актуальной задачей.

Исходные данные и постановка задачи

В рамках данной работы были рассмотрены два кронштейна, отличающиеся по сложности конструкции. Условно данные детали были обозначены как «Кронштейн 02» и «Кронштейн 03». В качестве исходной информации для создания электронной конструкторской документации на эти детали выступали фрагменты их чертежей, отсканированные в формате A4 (рисунок 1).

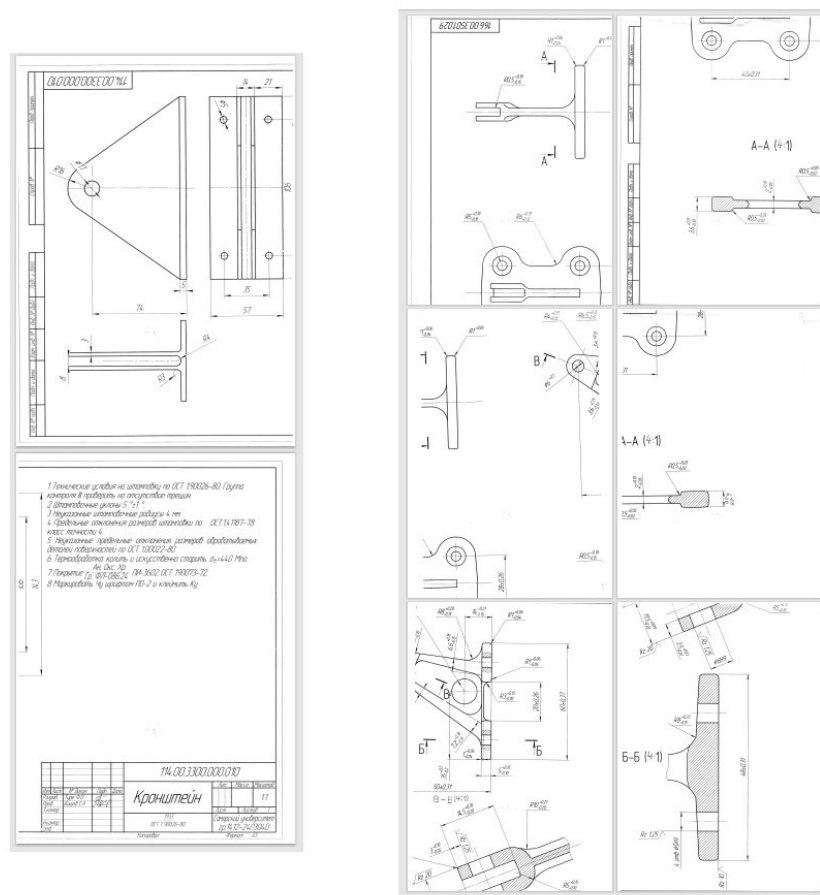


Рисунок 1 – Исходные данные для создания электронной рабочей конструкторской документации

В качестве среды для восстановления чертежей было выбрано специальное программное обеспечение (СПО) автоматизированного проектирования AutoCAD 2020, разработанное компанией Autodesk. Для построения электронных геометрических моделей (3D-моделей) деталей использовалось СПО твердотельного геометрического моделирования

Siemens NX 12, разработанное компанией Siemens PLM Software. Следует отметить, что выбранные программные средства на сегодняшний день являются одними из самых распространенных в различных отраслях машиностроения Российской Федерации. Однако актуальные версии отечественных программных продуктов для геометрического моделирования, таких как nanoCAD и Компас, обладают практически такими же возможностями и также могут быть использованы для решения рассмотренной задачи.

Восстановление чертежей

При восстановлении чертежей использовался заранее подготовленный шаблон чертежа. Шаблон чертежа позволяет повысить удобство работы, настроив размещение линий различного назначения на отдельные слои и присвоив им различные толщины и цвета [3]. При этом работа ведется на тёмном фоне для повышения контрастности оттенков линий. Настройки основных слоёв шаблона чертежа приведены на рисунке 2.

Имя	В..	З..	З..	Б..	П.	Цвет	Тип лин...	Тип лин...	Вес линий
!Основная						красный	Continu...	Continu...	0.70 мм
!Разомкнутая						250	Continu...	Continu...	1.00 мм
!Тонкая						зеленый	Continu...	Continu...	0.25 мм
!Штрихпункт...						синий	осевая	осевая	0.25 мм

Рисунок 2 – Настройки слоёв шаблона чертежа

Чертеж Кронштейна 02 был разделен всего на два фрагмента и при этом два вида детали и основные размеры размещены на первом фрагменте. Благодаря этому восстановление чертежа в системе AutoCAD было сравнительно легкой задачей.

Чертеж Кронштейна 03 был разбит на шесть фрагментов, причем некоторые из видов детали были разделены на части, размещенные на разных фрагментах, поэтому для восстановления чертежа необходимо было сначала сопоставить фрагменты между собой. Для этого использовалась функция импорта объектов в формате.pdf в систему AutoCAD в нужном масштабе (по умолчанию 25,4:1). Таким образом было получено изображение исходного чертежа, на основе которого было начато его восстановление.

Основным отличием данного чертежа являлось наличие допусков на размеры, которые в системе AutoCAD могут быть прописаны в свойствах размеров.

При восстановлении данного чертежа была выявлена недостаточность размеров для построения геометрии вилки кронштейна. Для решения этой проблемы необходимо было совместить фрагменты исходного чертежа для восстановления целостности вида вилки кронштейна.

Благодаря тому, что изображения исходного чертежа были импортированы в AutoCAD таким образом, что 1 мм линии, изображенной на чертеже, равен 1 мм новой линии, построенной инструментами СПО, стало возможным произвести измерения недостающих размеров на основе дополнительных построений (рисунок 3).

Восстановленные по имеющимся данным чертежи деталей представлены на рисунке 4.

Построение 3D-моделей

В твердотельном инженерном моделировании традиционно принят метод создания моделей путем последовательного наложения элементов деталей. Например, строится сначала основание модели в виде прямоугольного блока, цилиндра и т.п., затем на основании добавляются ребра, бобышки, отверстия, затем создаются галтели, скругления и фаски. Считается, что такой метод построения позволяет более гибко управлять параметрами модели, при этом является последовательным, что сохраняет читаемость истории построений и делает её максимально простой [4].

Но данный метод не всегда удобен, особенно для построения сложных деталей с большим количеством конструктивных элементов [5]. В таких случаях удобно использовать инструмент «Эскиз». Он позволяет накладывать параметрические ограничения на линии и кривые, вычерчивая проекцию детали на одну-две плоскости, подобно тому как они

изображены на чертеже. Затем эскиз преобразуется командой «Вытягивание» в трехмерную геометрию.

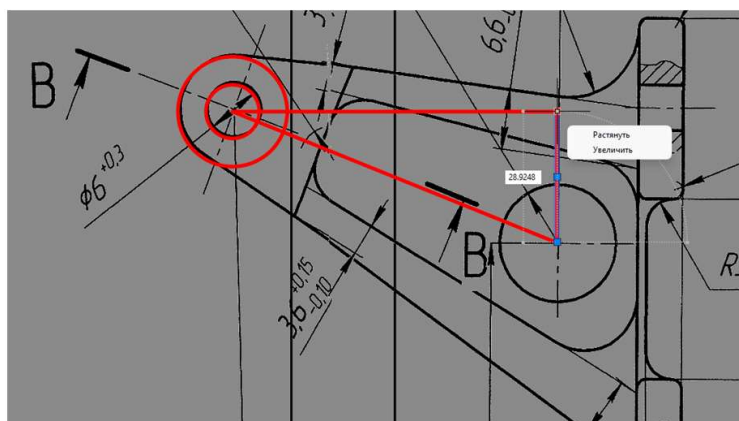
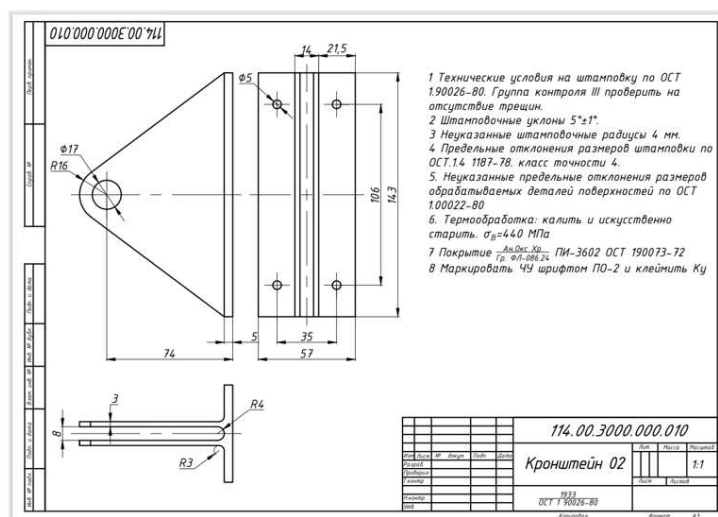
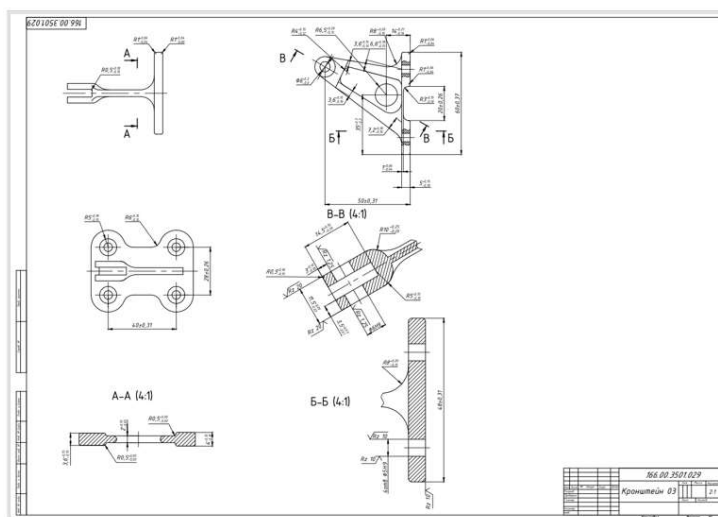


Рисунок 3 – Дополнительные построения для определения недостающих размеров



a)



6)

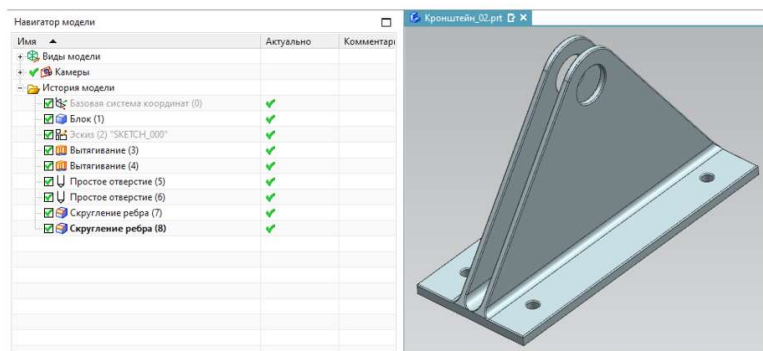
Рисунок 4 – Восстановленные чертежи деталей:
а) Кронштейн 02; б) Кронштейн 03

Для Кронштейна 02 построение 3D-модели проводилось по первому способу: сначала строилось основание, а затем на нем строился вертикальный элемент кронштейна (его вилка).

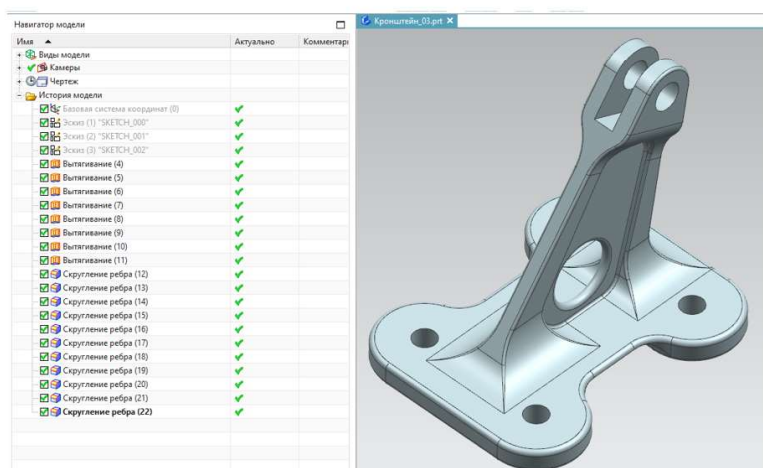
Для слияния вилки кронштейна с основанием в одно твердое тело использовалась булева операция «Объединение».

Для Кронштейна 03 построение 3D-модели проводилось по второму способу: сначала создавались эскизы отдельных частей, которые затем командой «Вытягивание» преобразовывались в твердые тела. Для объединения отдельных частей кронштейна в одно тело также использовалась булева операция «Объединение».

Для придания моделям окончательного вида для обеих деталей применялись команды «Скругление ребра» и «Создание фаски». Итоговый вид моделей кронштейнов с историями построения представлен на рисунке 5.



а)



б)

Рисунок 5 – 3D-модели деталей: а) Кронштейн 02; б) Кронштейн 03

Полученные 3D-модели – «конструкторские» модели – соответствуют исходной рабочей конструкторской документации (чертежам). Однако в общем случае 3D-модель, используемая для изготовления детали с помощью аддитивных технологий, должна иметь отличия.

Например, особенности 3D-печати не позволяют точно воспроизводить круглые отверстия, если их оси не перпендикулярны слоям материала. Поэтому такие отверстия необходимо рассверливать для придания им нужной формы. Следовательно, в 3D-модели для изготовления детали – «технологической» модели – они должны иметь диаметр меньше итогового. Требования к качеству поверхности в отверстиях могут потребовать рассверливать или разворачивать также и отверстия, оси которых перпендикулярны слоям. Такие отверстия в технологической модели тоже должны иметь уменьшенный диаметр.

Узкие пазы, особенно расположенные параллельно слоям материала, не могут быть воспроизведены при 3D-печати. Их необходимо пропиливать на этапе постобработки, т.е. в технологической модели они будут отсутствовать.

Требования к плоскостности (цилиндричности) и качеству поверхностей сопряжения с другими деталями могут потребовать их постобработки (обточки, шлифовки), на которую должен быть заложен припуск в технологической модели.

Технологическая 3D-модель может быть легко создана на основе конструкторской модели путем изменения отдельных параметров – диаметров отверстий, толщин оснований и т.п. Технологические модели кронштейнов для их изготовления с помощью аддитивных технологий показаны на рисунке 6.

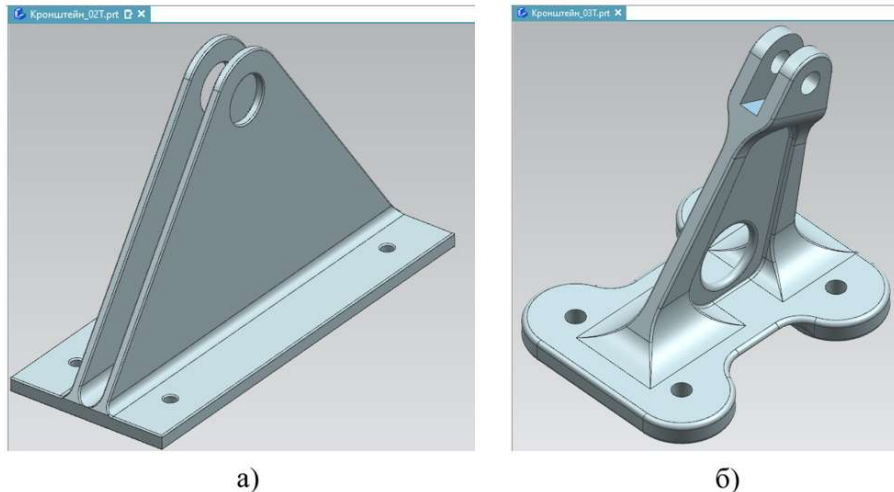


Рисунок 6 – Технологические модели деталей: а) Кронштейн 02, б) Кронштейн 03

Подготовка 3D-моделей для печати

Стандартным форматом электронных геометрических моделей для печати на 3D-принтерах является STL (от англ. Stereolithography, Стереолитография). В этом формате информация о трехмерном объекте хранится в виде набора треугольных граней, которые описывают его поверхность. Для загрузки моделей в СПО задания параметров 3D-печати (т.н. слайсер) необходимо конвертировать созданные файлы 3D-моделей из формата, используемого СПО твердотельного геометрического моделирования, в формат STL.

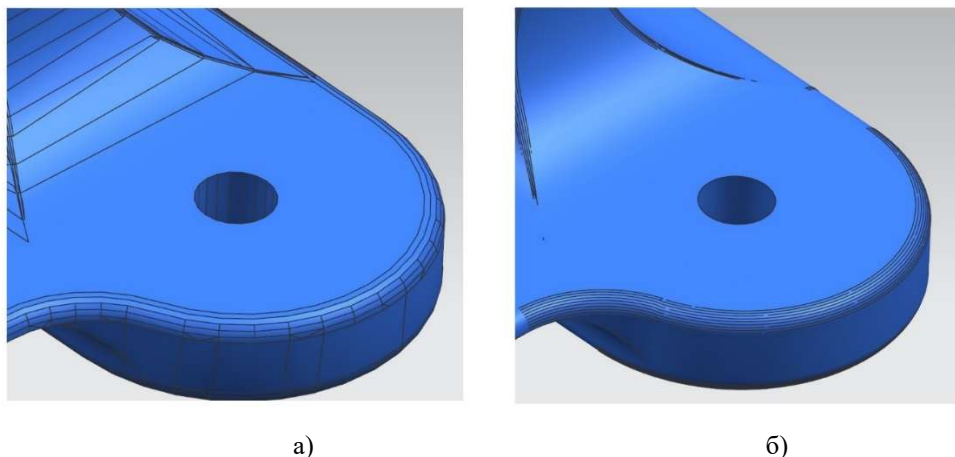


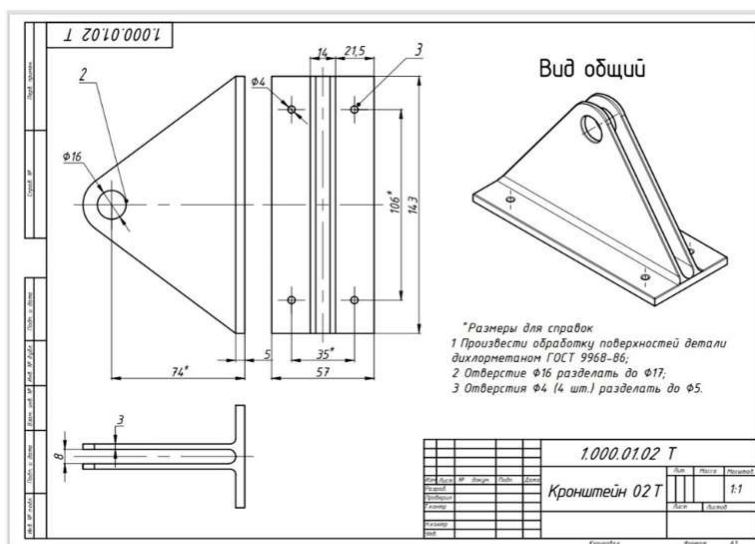
Рисунок 7 – Сравнение элементов моделей Кронштейна 03, экспортированных в формат STL с разной точностью: а) стандартная точность по углу (18°); б) максимальная точность по углу (1°)

В системе Siemens NX конвертация производится при помощи последовательности команд Файл/Экспорт/STL..., при этом можно задать параметры точности экспорта. В виду особенностей STL-формата любые криволинейные поверхности модели превращаются в набор плоскостей. Параметры точности экспорта модели регулируют точность воспроизведения криволинейных поверхностей. Максимальная точность по углу в системе Siemens NX составляет 1° . На рисунке 7 представлено сравнение элементов моделей Кронштейна 03 в формате STL, экспортированных с разной точностью.

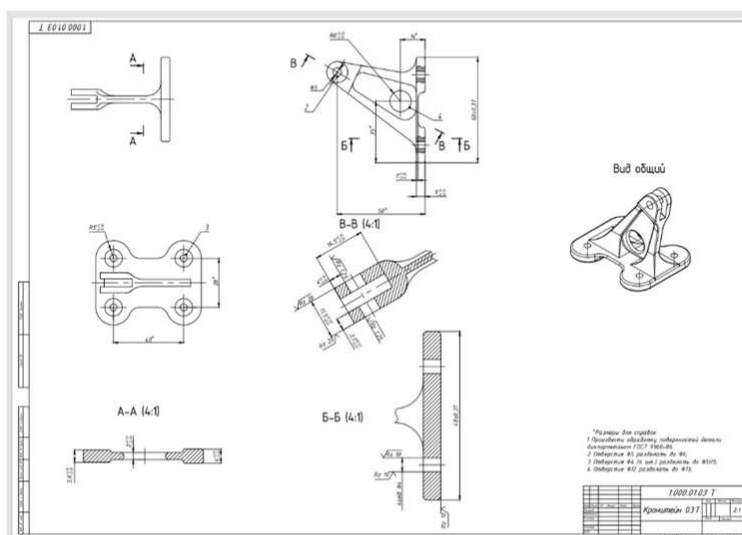
Для более точного воспроизведения криволинейных элементов деталей при подготовке технологических моделей деталей к 3D-печати следует использовать максимально возможную в СПО твердотельного геометрического моделирования точность экспорта в формат STL.

Подготовка технологических чертежей

Хотя часто встречается утверждение, что для изготовления деталей с помощью аддитивных технологий достаточно одной лишь 3D-модели, практика показывает, что это не так. Как было отмечено ранее, после собственно 3D-печати может потребоваться дополнительная постобработка: рассверливание отверстий, пропиливание пазов, шлифовка поверхностей для обеспечения требуемого качества и т.д. Указания на операции постобработки целесообразно размещать на технологическом чертеже.



а)



б)

Рисунок 8 – Технологические чертежи: а) Кронштейн 02; б) Кронштейн 03

Кроме того, полный цикл изготовления детали включает контроль ее качества, в первую очередь – контроль размеров. Хотя при наличии 3D-сканера для контроля размеров может использоваться конструкторская 3D-модель, она не содержит информации о допусках размеров, так что выявленные в ходе сканирования отклонения размеров не могут быть интерпретированы как допустимые или недопустимые. Допуски размеров также целесообразно размещать на технологическом чертеже.

На технологическом чертеже могут быть размещены и указания на специальные виды измерений и контроля: контроль качества поверхности, контроль плоскостности, контроль цилиндричности, контроль соосности и т.п.

Для преобразования полученных конструкторских чертежей в технологические были исключены размеры, по которым невозможно произвести контроль изготовленной детали. Функционально значимые размеры были переведены в раздел для справок. Отверстия, используемые для соединения с другими деталями, уменьшены на 1 мм в диаметре (в соответствии с изменениями при создании технологической 3D-модели на основе конструкторской). Технические требования дополнены пунктами о необходимости разделки отверстий до диаметра, указанного на конструкторском чертеже. Добавлены требования к качеству поверхностей сопряжения и указания на необходимость контроля плоскостности оснований.

Результат преобразования конструкторских чертежей в технологические представлен на рисунке 8.

Анализ трудозатрат

При выполнении работ по рассматриваемой методике были получены данные о временных затратах для каждого этапа подготовки электронной документации для аддитивного производства деталей. Эти данные приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы, собственно создание 3D-модели (создание конструкторской модели, создание на ее основе технологической модели, экспорт технологической модели в формат STL для подготовки к 3D-печати) занимает от 20 до 30 % времени разработки электронной конструкторской документации. Остальное время приходится на подготовительные операции и создание сопроводительной документации (электронных чертежей).

Таблица 1 – Данные о трудозатратах на разработку моделей деталей

Этапы работ	Кронштейн 02	Кронштейн 03
Построение основной геометрии, мин	15	60
Построение размерных линий, мин	20	180
Задание технических условий, мин	15	0
Оформление основной надписи чертежа, мин	10	10
Подготовка конструкторского чертежа к экспорту, мин	5	5
Создание технологического чертежа, мин	10	30
Подготовка технологического чертежа к экспорту, мин	5	5
Создание конструкторской 3D-модели, мин	25	50
Создание технологической 3D-модели, мин	10	15
Экспорт технологической 3D-модели в формат STL, мин	5	5
Итоговое время разработки	120 мин (2 ч)	360 мин (6 ч)

Следует отметить, что приведенные выше данные по временным затратам справедливы для опытных пользователей СПО геометрического моделирования и хорошего качества исходной рабочей конструкторской документации (высокий контраст линий чертежа с фоном, разборчивые надписи, отсутствие ошибок в размерах и т.д.).

Тестовая печать 3D-моделей

Для проверки готовности созданных технологических 3D-моделей к практическому использованию была проведена их тестовая печать на 3D-принтере Creality Ender 3 S1 PLA-пластиком. Основные настройки печати представлены в таблице 2.

Полученные в результате печати детали показаны на рисунке 9.

Таблица 2 – Настройки печати

Настройка печати	Значение
Высота слоя, мм	1,6
Масштаб печати, %	100
Температура нагрева пластика, град.	205
Температура нагрева стола, град.	70



*Рисунок 9 – Результаты тестовой печати технологических 3D-моделей:
а) Кронштейн 02, б) Кронштейн 03*

В ходе контрольных измерений готовых моделей было выявлено, что при печати моделей в масштабе 100 % из-за усадки пластика в результате остывания контрольные размеры, обозначенные на технологических чертежах, не обеспечиваются. При этом для Кронштейна 03 отклонение контрольных размеров превысило величину допуска, указанного на чертеже. Так в результате измерений Кронштейна 03 было установлено, что длина основания составляет 59,60 мм, тогда как указанный на технологическом чертеже размер составляет $60 \pm 0,37$ мм.

Усадка материала после 3D-печати характерна практически для всех видов аддитивных технологий. Это нужно учитывать при разработке электронной документации для аддитивного производства. В случае разработки документации под конкретную комбинацию модели оборудования и марки сырья можно заранее смасштабировать технологическую с модель с учетом ожидаемой усадки. В общем случае необходимо включить в технические условия указания на необходимость предварительной 3D-печати контрольного объекта для оценки усадки и последующего масштабирования технологической 3D-модели перед печатью. Операция масштабирования не требует редактирования технологической 3D-модели и может быть выполнена непосредственно в слайсере.

Форматы хранения электронной документации

Требования к электронным чертежам деталей приведены в стандарте ГОСТ Р 2.521-2021 [6], где в качестве формата файлов электронных чертежей указан формат DWG. Данный формат используется в СПО AutoCAD по умолчанию, что позволяет сохранять и передавать в другое СПО геометрического моделирования данные о свойствах слоев, настройки печати и многое другое. Кроме того, в случае распечатанных на бумаге и заверенных подписями чертежей, возможно хранение их отсканированных версий в формате PDF («электронная бумага»).

СПО твердотельного геометрического моделирования имеет собственные форматы хранения данных. Так в Siemens NX 3D-модели сохраняются в файле формата PRT. Данный формат файла позволяет сохранять не только информацию о геометрических характеристиках детали, но и дерево построения модели. Но собственные форматы СПО твердотельного геометрического моделирования являются проприетарным и закрытыми. Они могут меняться при переходе от одной версии СПО к другой и не подходят для переноса данных между разным СПО. В стандарте ГОСТ Р 2.521-2021 приведены примеры унифицированных и стандартизованных форматов представления трехмерных геометрических моделей, среди которых наиболее подходящими являются форматы STEP и Parasolid – так называемые «нейтральные форматы». Однако при сохранении в нейтральных форматах теряется история построения детали, что делает невозможным ее последующее редактирование.

STEP-файл является одним из новых форматов для обмена данными 3D-моделей между CAD-программами. STEP является аббревиатурой от "STandard for the Exchange of the Product model data" (Стандарт для обмена данным о модели изделия). Формат STEP определен

Международной организацией по стандартам ISO (International Standards Organization) и описан в ГОСТ Р ИСО 10303-1-2022 [7].

Большинство современного СПО позволяет экспортировать данные о геометрии деталей в этот формат. При этом актуальные версии формата (начиная с AP242) поддерживают сохранение, наряду с описанием геометрии детали, также информации, связанной с производством: размеры, допуски, материалы и инструкции по обработке, необходимые для изготовления, испытания и сборки компонентов. Это потенциально позволяет отказаться от построения технологических чертежей и включить всю необходимую информацию в конструкторскую 3D-модель.

Заключение

В данной работе представлена методика разработки на основе традиционной рабочей конструкторской документации электронной рабочей конструкторской документации, необходимой для изготовления деталей с применением аддитивных технологий. Проанализирована трудоемкость создания такой документации с использованием СПО Autodesk AutoCAD и Siemens NX.

После итогам данной работы можно сделать следующие выводы:

1. Кроме 3D-моделей деталей, созданных на основе рабочей конструкторской документации (конструкторских моделей), для изготовления с применением аддитивных технологий требуются технологические 3D-модели, созданные с учетом последующей пост-обработки детали после 3D-печати. Также необходим электронный технологический чертеж с указанием операций пост-обработки, контрольных размеров, допусков, требований к качеству поверхности, указаний по контролю параметров качества детали и т.д.

2. При ведении электронного документооборота конструкторские и технологические 3D-модели, а также конструкторские и технологические электронные чертежи желательно хранить совместно. Конструкторские 3D-модели могут храниться либо в нейтральном формате STEP (если не предполагается изменение этих моделей), либо в формате того СПО, что было использовано для их создания. При этом использование актуальных версий формата STEP потенциально позволяет отказаться от технологических электронных чертежей, включив всю информацию, необходимую для пост-обработки и контроля детали непосредственно в конструкторскую 3D-модель. Технологические 3D-модели могут храниться в формате STL, т.е. в виде, готовом для 3D-печати.

Таким образом процесс создания электронной конструкторской документации требует комплексного подхода для соблюдения правил ведения конструкторской и технологической документации и обеспечения возможности ее последующего использования для изготовления деталей с применением аддитивных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубащевский Д.С. Российский рынок аддитивных технологий на новом витке // Журн. Business Excellence. 2025. № 3. – С. 26-34.
2. Панамарев Г.Е., Лякин А.С., Ефремов А.В. Оценка возможности использования мобильных аддитивных комплексов при ремонте оборудования в полевых условиях // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: научно-технический журнал. 2025, № 6 (374). – С. 29-37.
3. Антипина Н.А., Будницкая Ю.Ю., Винокурова Г.Ф., Куликова О.А. Лабораторный практикум по компьютерному моделированию в САПР AutoCAD. Учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 142 с.
4. Сапунов В. В., Евстигнеев А. Д. Конструкторско-технологическая подготовка производства в CAD-CAM-CAE системах. Сборник лабораторных работ: учебно-методическое пособие – Ульяновск: УлГТУ, 2021. – 99 с.
5. Рязанов А.И., Горячкин Е.С., Мелентьев В.С. Параметрическое твердотельное CAD моделирование в Siemens NX. Учебное пособие – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 164 с.
6. ГОСТ Р 2.521-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Единая система конструкторской документации. Электронная конструкторская документация. Требования к форматам представления трехмерных геометрических моделей
7. ГОСТ Р ИСО 10303-1-2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы.

Ляскин Антон Сергеевич
Федеральное государственное
автономное учреждение «Военный
инновационный
технополис «ЭРА»
Кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник,
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, 353456,
Краснодарский край, г. Анапа,
Пионерский пр-т, 41
Тел. 8 918-581-41-13
Email: efremov55alex@gmail.com

Казмирук Даниил Александрович
Федеральное государственное
автономное учреждение «Военный
инновационный
технополис «ЭРА»
Оператор научной роты,
353456, Краснодарский край, г.
Анапа, Пионерский пр-т, 41
Тел. 8 904-110-44-62
Email: kazmiruk.dania.irk@gmail.com

LYASKIN A.S., EFREMOV A.V., KAZMIRUK D.A.

DETAILS OF TRANSFORMATION OF TRADITIONAL MANUFACTURING DESIGN DOCUMENTS INTO ELECTRONIC FORM FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract. Taking as an example two supports of different complexity, for which manufacturing design documents exist in the form of A4 format scanned fragments of technical drawings, we analyze feasibility of creation electronic manufacturing design documents necessary for additive manufacturing. We describe different stages of transformation, analyze software features important for accuracy and ease of creation of electronic geometrical models suitable for 3D-printing. We propose a methodology for transformation of traditional manufacturing design documents into electronic form, required for additive manufacturing and estimate time expenditure for this transformation. We use special-purpose software Autodesk AutoCAD and Siemens NX for this estimation.

Keywords: additive technology, 3D-printing, manufacturing design documents, electronic model of a detail, 3D-model.

BIBLIOGRAPHY

1. Trubashevskij D.S. Rossijskij rynek additivnykh tekhnologij na novom vitke // Zhurn. Business Excellence. 2025. № 3. - P. 26-34.
2. Panamarev G.E., Lyaskin A.S., Efremov A.V. Ocenka vozmozhnosti ispolzovaniya mobilnykh additivnykh kompleksov pri remonte oborudovaniya v polevykh usloviyakh // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii: nauchno-tekhnicheskij zhurnal. 2025, № 6 (374). – P. 29-37.
3. Antipina N.A., Budnickaja Ju.Ju., Vinokurova G.F., Kulikova O.A. Laboratornyj praktikum po kompjuternomu modelirovaniyu v SAPR AutoCAD. Uchebno-metodicheskoe posobie. - Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2021. - 142 p.
4. Sapunov V. V., Evstigneev A. D. Konstruktorsko-tekhnologicheskaja podgotovka proizvodstva v CAD-CAM-CAE sistemakh. Sbornik laboratornykh rabot: uchebno-metodicheskoe posobie - Uljanovsk: UIGTU, 2021. - 99 p.
5. Rjazanov A.I., Gorjachkin E.S., Melentev V.S. Parametricheskoe tverdotelnoe CAD modelirovanie v Siemens NX. Uchebnoe posobie - Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2017. - 164 p.
6. GOST R 2.521-2021. Nacionalnyj standart Rossijskoj Federacii. Edinaja sistema konstruktorskoj dokumentacii. Ehlektronnaja konstruktorskaja dokumentacija. Trebovanija k formatam predstavlenija trekhmernykh geometricheskikh modelej
7. GOST R ISO 10303-1-2022. Nacionalnyj standart Rossijskoj Federacii. Sistemy avtomatizacii proizvodstva i ikh integracija. Predstavlenie dannykh ob izdelii i obmen ehtimi dannymi. Chast 1. Obshhie predstavlenija i osnovopolagajushhie principy.

Lyaskin Anton Sergeevich
Military Innovative Technopolis
“ERA”
PhD Engineering, Associated
Professor, Senior Researcher,
353456, Krasnodar reg., Анапа,
Pionerskij prospect, 41
Phone 8 905-018-69-60
Email: alyskin@mail.ru

Efremov Alexandr Vasilyevich
Military Innovative Technopolis “ERA”
PhD Engineering, Researcher,
353456, Krasnodar reg., Анапа, Pionerskij
prospect, 41
Phone 8 918-581-41-13
Email: efremov55alex@gmail.com

Kazmiruk Daniil Alexandrovich
Military Innovative Technopolis
“ERA”
Operator of Scientific Company,
353456, Krasnodar reg., Анапа,
Pionerskij prospect, 41
Phone 8 904-110-44-62
Email:
kazmiruk.dania.irk@gmail.com

НЕМЕНКО А.В., НИКИТИН М.М., МЕШКОВ В.В.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В работе предложен критерий отсутствия трещин при сверлении отверстия в заготовке из хрупкого полимерного материала на основе анализа поля напряжений как функции комплексных координат. Достаточным условием отсутствия трещины является существование конечного предела определенного вида, составленного из коэффициентов степенного ряда для функции, связывающей касательные напряжения при кручении с комплексными координатами в исследуемом сечении. Показано, что при соответствующем выборе контрольных точек на контуре сечения, применение метода позволяет обойтись только тремя датчиками напряжений.

Ключевые слова: сверление, пластмассы, полимеры, прогноз механических напряжений, проактивное управление.

Введение

В настоящее время изделия из полимерных материалов получили широкое распространение при формировании технических объектов.

При проектировании таких изделий с заданными технологическими свойствами требуется получение отверстий с одновременным соблюдением геометрии и чистоты получаемой поверхности, а также сохранения формы изделия после выполнения операции.

Сверление отверстий резанием до настоящего времени обеспечивает соблюдение отмеченных требований для широкого класса полимерных материалов в наиболее ответственных случаях [1].

Вместе с тем, производительность процесса ограничена вследствие высокой чувствительности полимеров к перегреву и механическим напряжениям. Большинство пластмасс обладают высоким коэффициентом температурного расширения [2], что, в сочетании с малой теплопроводностью, принципиально отличает их сверление от сверления металлов, у которых высокая теплопроводность, и температурные напряжения в которых имеют меньший градиент в объеме заготовки.

В случае полимерных материалов высокий градиент тепловых напряжений может привести к нарушению целостности заготовки [3], [4], что препятствует росту скорости обработки. Неравномерность распределения механических свойств по объему (для ряда значимых в технике полимеров и композитов анизотропия принципиально неустранима [5], [6]) усиливает эффект, что делает актуальной задачу об управлении технологическим процессом сверления единичного отверстия.

В настоящей работе предлагается алгоритм управления процессом сверления в полимерном материале, основанный на том принципе, что отверстие в процессе его получения вызывает переконфигурацию механических напряжений в сечении, перпендикулярном оси отверстия, которые образуют комплекснозначную аналитическую функцию.

Если разместить на внешнем контуре сечения некоторую систему датчиков напряжений, то их показания будут отличаться от режимов, ведущих и не ведущих к раскалыванию заготовки по критерию наличия и количества особых точек поля напряжений внутри замкнутого контура, что позволит установить критичность технологического процесса.

Для исследования поля напряжений рассмотрим следствия из комплекснозначных интегралов, установленные в работе [7].

Цель работы

Разработка алгоритма управления режимом сверления заготовки из полимерного материала с целью предотвращения её хрупкого разрушения с одновременной максимизацией интенсивности обработки.

Материал исследования

Рассмотрим режимы сверления отверстия, ведущие и не ведущие к нарушению сплошности объемов, не затрагиваемых отверстием.

Будем учитывать переконфигурацию механических напряжений, возникающую при удалении объема из обрабатываемой области.

В отличие от статического случая объекта с неравномерным полем напряжений, деталь с активной областью обработки характеризуется механическим разрушением материала.

Математически внутренний контур области обработки может быть описан как геометрическое место особых точек некоторой аналитической функции напряжений.

Вследствие вращательного способа обработки, характерного для спиральных и перьевых сверл, в объеме заготовки будет возникать поле напряжений с ненулевыми компонентами тензора.

В работе [7] было показано, что, при определенных условиях, эти компоненты образуют комплекснозначную аналитическую функцию пространственных координат, которая, в частности, может быть получена путем постобработки сигналов.

Практическими следствиями данного эффекта будут:

- величина интеграла от функции напряжений по любому замкнутому контуру с проходимым отверстием внутри будет ненулевой;
- величина этого же интеграла в случае сплошности материала в объемах, не затрагиваемых отверстием, будет инвариантна относительно формы внешнего контура;
- величина этого же интеграла будет меняться в случае нарушения сплошности в объемах, не затрагиваемых отверстием.

Рассмотрим создание экспресс-классификатора, позволяющего определить наличие трещин в контролируемом сечении по сигналам, поступающим с датчиков напряжений на внешнем контуре.

Используя принцип комплекснозначного описания плоского поля скалярной функции напряжений, сформулированный в работе [7], интеграл от поля напряжений по замкнутому контуру, охватывающему плоскую область D , представим в виде

$$J(z) = \oint_D q(z) dz, \quad (1)$$

где q – функция напряжений в точке z , представляемой как комплексное число, которое получено из действительных координат (x, y) сечения детали, перпендикулярного оси проходимого отверстия; D – область на комплексной плоскости переменной z .

Рассмотрим следствия из существования интеграла (1) в случае, если внешний контур области D совпадает с геометрической границей детали, а напряжения на нем могут быть непосредственно измерены датчиками, размещенными в выбранных точках.

При механической обработке резанием удаление материала сопровождается созданием разрушающих напряжений в зоне обработки, которая математически представляет собой геометрическое место особых точек функции напряжений.

В силу теоремы Коши интеграл (1), в том числе, приближенно вычисленный по массиву эмпирических значений действительной и мнимой частей подинтегральной функции с помощью известных соотношений, отличается от нуля. Вычисляя его в различные моменты времени t , получим комплекснозначную функцию, параметризуемую значением действительного времени

$$J(t) = \oint_D q(t, z) dz = J_1(t) + i \cdot J_2(t). \quad (2)$$

Инвариантность величины (2) относительно времени указывает на стабильность процесса и должно поддерживаться системой автоматического регулирования. Управляющими воздействиями при этом могут быть подача сверла, скорость обработки, подача смазочно-охлаждающей жидкости или другой механизм температурной стабилизации рабочей области.

Для создания классификатора режимов используем следующее утверждение.

Пусть $\{c_0, c_1, c_2, \dots, c_n, \dots\}$ – последовательность коэффициентов разложения комплекснозначной функции напряжений $q(z)$ в степенной ряд с центром сходимости в точке $(z = z_0)$ комплексной плоскости

$$q(z) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n (z - z_0)^n. \quad (3)$$

Тогда, если из этих коэффициентов можно построить конечный предел

$$J = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^m \frac{c_n}{n+1} \binom{m}{n+1}, \quad (4)$$

то функция $q(z)$ будет аналитична (не будет содержать сингулярностей) в каждой точке прямоугольной области M такой, что при $z = x + i \cdot y$

$$x \in \left(z_0 - \frac{1}{2}, \infty \right), y \in (-\infty, \infty). \quad (5)$$

Кроме того, несобственный интеграл от этой функции по любому пути, начинающемуся в точке z_0 и заканчивающемуся в бесконечно удаленной точке, будет сходиться к величине (4)

$$\int_{z_0}^{\infty} q(z) dz = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^m \frac{c_n}{n+1} \binom{m}{n+1}. \quad (6)$$

Эти свойства поля напряжений могут быть использованы для вычисления интегралов от $q(z)$ между точками, находящимися правее z_0 . Так, взяв коэффициенты степенных разложений $q(z)$ в точках z_1 и z_2 , получим

$$\int_{z_1}^{z_2} q(z) dz = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{c_n(z_1) - c_n(z_2)}{n+1} \cdot \binom{m}{n+1}. \quad (7)$$

Формула (7) применима также в качестве расчетной при вычислении интегралов непосредственно по внешнему контуру контролируемой детали. При этом точность получаемых результатов не зависит от числа используемых точек, если применяется способ определить все коэффициенты степенного разложения в каждой из них. Нам представляется допустимым использовать следствие из дифференциального уравнения колебаний детали, позволяющее заменить пространственные координаты временными и путем анализа возникающих колебаний в выбранных контрольных точках

Рассмотрим применение предела (7) в случае, когда на внешнем контуре размещена система из n датчиков. Суммируя интегралы по последовательным путям, образующим контур, получим

$$\oint_C q(z) dz = \sum_{k=1}^n \int_{l_k} q(z) dz. \quad (8)$$

Вместе с тем, непосредственное суммирование слагаемых в формуле (8), представленных в предельной форме (7) в случае конечности пределов (условие отсутствия трещин) всегда приводит к нулевому результату за счет попарного вычитания одних и тех же коэффициентов, что следует также из свойства равенства нулю интеграла по замкнутому контуру от аналитической функции.

Для получения минимально достоверного результата с использованием формул (7) и (8) должны применяться три датчика, соединенные путями, близкими к равноудаленным.

В случае же, когда внутри контура имеется сингулярность, обусловленная наличием устья трещины, результатом той же самой операции будет произвольное число, хаотически меняющееся при добавлении очередного слагаемого, так как отображение рассмотренной области M , содержащей сечение детали, на сплошной единичный круг окажется невозможным, что приведет к расходимости предела (4) и всех следующих из него соотношений, использованных в формуле (8).

Кроме того, если взять систему координат так, чтобы действительная координата x контрольной точки была нулевой, то условием аналитичности $q(z)$ во всём сечении детали будет само существование предела (4), действительного или комплексного, составленного из коэффициентов разложения функции $q(z)$ в степенной ряд в окрестности этой точки. Нарушение сходимости суммы (4) с течением времени, соответственно, может быть интерпретировано как появление дефекта (точки сингулярности) в контролируемом сечении.

Выводы

В настоящей работе предложен алгоритм управления процессом сверления отверстия в изделии из полимерных материалов на основе измерения касательных напряжений в системе контрольных точек, размещенных на внешней поверхности обрабатываемого изделия.

Распределение компонент тензора напряжений рассматривается как аналитическая функция комплексных пространственных координат времени, на основании чего вводится численное (1) и аналитическое (8) представление одного и того же интеграла по замкнутому контуру, проходящему по внешней поверхности изделия.

Основная идея вычислительного алгоритма состоит в использовании теоремы Коши для аналитической функции комплексного переменного, согласно которой интеграл по замкнутому контуру равен нулю, и сравнении этого теоретического значения с практически вычисленным.

Для практического использования теоремы Коши была введена интерпретация интеграла по замкнутому контуру как суммы трех числовых рядов, коэффициенты которых могут быть непосредственно получены обработкой сигналов с тензодатчиков.

В этом случае количество контрольных точек может быть сокращено до трех.

Практическая реализация программно-аппаратного комплекса может быть выполнена с использованием схмотехнических решений, аналогичных предложенным в работе [8].

Для осуществления управляющего воздействия расчетное значение интеграла сравнивается с допустимыми значениями, получаемыми при нормировке, после чего схема может применяться на типовых изделиях, обладающих вариациями характеристик материала.

В качестве управляющего воздействия предполагается уменьшение подачи сверла или изменение количества подаваемой смазочно-охлаждающей жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xu J, Geier N, Shen J, Krishnaraj V, Samsudeensadham S. A review on CFRP drilling: fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:9677-707.
2. Ge, J., Fisher, T., Kazanci, Z., Jin, Y., & Sun, D.. Drilling-induced defects and mechanical performance of open-hole structures in thermoplastic and thermoset polymer composites. *Composites Communications*, 2025: 53, 102223.
3. Ciecielag K. Study on the machinability of glass, carbon and aramid fiber reinforced plastics in drilling and secondary drilling operations. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 2022, vol. 16, no 2, p. 57-66.
4. Dalle Mura M., Dini G. Drilling carbon fiber reinforced plastics with pre-cooling treatment by cryogenic fluid. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 68, p. 23-31.
5. Jagadeesh, P, Rangappa S.M., Suyambulingam, I, et al. Drilling characteristics and properties analysis of fiber reinforced polymer composites: a comprehensive review. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no 3.
6. Seo, Jaewoo, Kim, Yeonoh, Kim, Dong Chan, et al. Numerical and experimental investigation of the delamination in drilling of the carbon fiber-reinforced plastic composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 112, no 7, p. 2373-2387.
7. Неменко А.В. Диагностика ранней стадии усталости вращающихся деталей машин/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, №5(349), 2021, С.151-157.
8. Тагаев А.И. Анализ структуры полустационарного программно-аппаратного комплекса (ППАК) мониторинга производственных систем индустрии 4.0/А.И. Тагаев, Е.Д. Коршунова //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, №3(371), 2025, С.151-158.

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

Мешков Владимир Викторович
ФГАОУ «Севастопольский
государственный университет», г.
Севастополь
Кандидат технических наук,
проректор по развитию и
цифровой трансформации СевГУ
Тел. +7 (8692) 41-77-41 доб.1013
E-mail: meshkov@sevsu.ru

NEMENKO A.V., NIKITIN M.M., MESHKOV V.V.

PREDICTIVE ESTIMATES OF TEMPERATURE WHEN DRILLING HOLES IN POLYMERIC PRODUCTS

Abstract. *This paper proposes a criterion for the absence of cracks when drilling a hole in a brittle polymer workpiece based on an analysis of the stress field as a function of complex coordinates. A sufficient condition for the absence of cracks is the existence of a finite limit of a certain type, composed of the coefficients of a power series for the function relating the shear stresses in torsion to the complex coordinates in the cross-section under study. It is shown that with an appropriate choice of control point on the cross-section contour, the method can be applied using only three stress sensors.*

Keywords: *Drilling, plastics, polymers, mechanical stress forecast, proactive control.*

BIBLIOGRAPHY

1. Xu J, Geier N, Shen J, Krishnaraj V, Samsudeensadham S. A review on CFRP drilling: fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:9677-707.
2. Ge, J., Fisher, T., Kazanci, Z., Jin, Y., & Sun, D.. Drilling-induced defects and mechanical performance of open-hole structures in thermoplastic and thermoset polymer composites. *Composites Communications*, 202553, 102223.
3. Cieciela K. Study on the machinability of glass, carbon and aramid fiber reinforced plastics in drilling and secondary drilling operations. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 2022, vol. 16, no 2, p. 57-66.
4. Dalle Mura M., Dini G. Drilling carbon fiber reinforced plastics with pre-cooling treatment by cryogenic fluid. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 68, p. 23-31.
5. Jagadeesh, P, Rangappa S.M., Suyambulingam, I, et al. Drilling characteristics and properties analysis of fiber reinforced polymer composites: a comprehensive review. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no 3.
6. Seo, Jaewoo, Kim, Yeonoh, Kim, Dong Chan, et al. Numerical and experimental investigation of the delamination in drilling of the carbon fiber-reinforced plastic composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 112, no 7, p. 2373-2387.
7. Nemenko A.V. Diagnostika rannej stadii ustalosti vrashchayushchihsvyaznykh detalej mashin/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, №5(349), 2021, S.151-157.
8. Tagaev A.I. Analiz struktury polustacionarnogo programmno-apparatnogo kompleksa (PPAK) monitoringa proizvodstvennykh sistem industrii 4.0/A.I. Tagaev, E.D. Korshunova //Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, №3(371), 2025, S.151-158.

Nemenko Alexandra Vasilyevna
FSAEI HE Sevastopol State
University, Sevastopol
Ph.D. in Tech Science, docent of
chair «Technical Mechanics and
Machine Science»
Universitetskayast, 33, Sevastopol,
Russian Federation, 299053
Phone. +79788330519
E-mail: valesan@list.ru

Nikitin Mikhail Mikhailovich
FSAEI HE Sevastopol State
University, Sevastopol
Senior lecturer of chair «Higher
Mathematics »
Universitetskayast, 33, Sevastopol,
Russian Federation, 299053
Phone +79788150316
E-mail: mmnikitin@sevsu.ru

Meshkov Vladimir Viktorovich
FSAEI HE Sevastopol State
University, Sevastopol
Ph.D. inTechScience, Vice-Rector
for Development and Digital
Transformation of Sevastopol State
University
Universitetskayast, 33, Sevastopol,
Russian Federation, 299053
Тел. +7 (8692) 41-77-41 доб.1013
E-mail : meshkov@sevsu.ru

ЗЕМЛЯНУШНОВ Н.А., ЗЕМЛЯНУШНОВА Н.Ю.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА УПРОЧНЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ КОНИЧЕСКИХ И ПАРАБОЛОИДНЫХ ПРУЖИН

Аннотация. Существующие способы упрочнения пружин не применимы для повышения долговечности пружин конической или параболической формы, витки которых при максимальном сжатии входят друг в друга, для случая при котором высота сжатой пружины равна диаметру ее витка. Это обусловлено различиями в геометрии пружин в сжатом состоянии, что требует использования альтернативных способов упрочнения. Предложен новый способ, преимущество которого заключается в обеспечении технической возможности создания пластических деформаций наклёпом на поверхностях и в витках указанных пружин.

Ключевые слова: способ, устройство, метод конечных элементов, остаточные напряжения, долговечность, упрочнение, коническая пружина, параболическая пружина.

Введение

В конструкциях разнообразных агрегатов и механизмов, эксплуатируемых в сельском хозяйстве, транспортной отрасли, авиации, автомобилестроении и иных сферах, применяются пружины [1, 2]. Объёмы производства предприятий – производителей пружин в России в последние годы нарастают. Так, например, ООО «ПК «Пружинный проект» (г. Казань) способно производить порядка 20 тысяч типоразмеров пружин диаметром проволоки $d = 0,2...50$ мм и до 8 тонн продукции в сутки, ОАО «НПП «Пружинный Центр» (г. Санкт-Петербург) ежегодно выпускает до 25 тысяч видов упругих изделий объемом до нескольких миллионов штук, ООО НПЦ «Пружина» (г. г. Ижевск) изготавливает более 200 типов пружин объемом до 15000 тонн в год и т.д. Современные пружины представляют собой высокотехнологичные изделия с высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками. Повышения долговечности и релаксационной стойкости пружин добиваются двумя основными путями: увеличением прочностных характеристик заготовки (проволоки, прутка) и применением различных упрочняющих операций в процессе изготовления [3].

Для улучшения эксплуатационных характеристик материалов заготовки пружин, повышения их прочности и надежности, выполняют следующее: оптимизируют химический состав сталей в зависимости от условий эксплуатации пружин; совершенствуют технологии выплавки сталей, включая применение электрошлакового и вакуумно-дугового переплавов для удаления неметаллических включений; совершенствуют технологии производства проволоки; проводят термообработку проволоки для повышения её прочности и стойкости к внешним воздействиям; разрабатывают и внедряют технологии улучшающие качество поверхности проволоки, с целью удаления обезуглероженного слоя и снижения шероховатости [3]. Для обеспечения требуемых характеристик пружин, таких как жёсткость, долговечность, усталостная прочность и других, необходимо пружины упрочнять. Повышения эксплуатационных характеристик пружин за счет применения упрочняющих операций добиваются методами: поверхностного пластического деформирования витков при дробемётной, гидроабразивной обработке; заневоливания; контактного заневоливания; термоосадки [4, 5].

Конические и параболические пружины обладают большей стабильностью по сравнению с цилиндрическими, а в сжатом состоянии занимают меньше места по высоте [6]. Традиционные методы и оборудование для повышения прочности пружин не подходят для обработки всего многообразия пружин, в частности, пружин конической формы или в виде параболического вращения, витки которых при максимальном сжатии входят друг в друга, при этом высота сжатой пружины равна диаметру ее витка.

Целью работы является совершенствование способа упрочнения высоконагруженных конических и параболических пружин, витки которых при максимальном сжатии входят друг

в друга, при этом высота сжатой пружины равна диаметру ее витка, что позволит повысить стабильности упругих свойств пружин и сократить время упрочнения.

Основная часть

Рассмотрим наиболее распространенные технологические методы повышения прочности винтовых цилиндрических пружин.

Дробемётная обработка является технологическим процессом, выполняемым на специализированном оборудовании. В ходе этого процесса обрабатываемая пружина помещается в камеру, где подвергается воздействию высокоскоростного потока дроби, движущейся со скоростью 50...90 м/мин. Для обработки применяются стальная или чугунная дробь. Устройство, транспортирующее пружину, должно обеспечивать равномерное покрытие всей её поверхности. В основном для дробемётной обработки пружин используются механические установки, где поток дроби создается с помощью турбинных устройств.

При контакте дроби с поверхностью пружины происходит пластическая деформация поверхностного слоя материала. В результате наклепа увеличиваются твердость и устойчивость к малым пластическим деформациям. Дробеструйная обработка приводит к увеличению плотности дислокаций, что сопровождается ростом удельного объема и образованием остаточных сжимающих напряжений. Эти факторы положительно влияют на эксплуатационные характеристики пружин. Повышение прочности металла в наружных слоях, наиболее подверженных нагрузкам, увеличивает сопротивление зарождению усталостных трещин, что дополнительно усиливается благодаря остаточным сжимающим напряжениям.

На рисунке 1 представлена схема, иллюстрирующая распределение напряжений в поверхностном слое и по сечению витка пружины при наличии остаточных сжимающих напряжений [7].

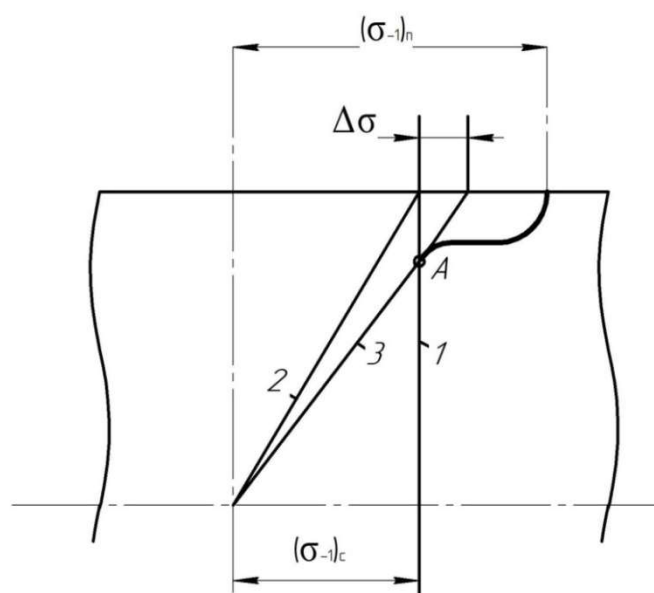


Рисунок 1 – Распределение напряжений в витке пружины при наличии остаточных сжимающих напряжений

На графическом представлении отражены два ключевых элемента анализа усталостной прочности. Кривая 1 демонстрирует распределение предельных амплитуд напряжений (пределов выносливости) по сечению материала. $(\sigma_{-1})_п$ – предел выносливости поверхностного слоя металла, учитывающий благотворное воздействие остаточных сжимающих напряжений; $(\sigma_{-1})_с$ – предел выносливости материала в центральной зоне (сердцевине). Кривая 2 отображает эпюру напряжений, возникающих от внешнего нагружения в неупрочнённой пружине. При наличии упрочняющей обработки процесс зарождения усталостной трещины локализуется в точке А – месте пересечения: эпюры рабочих напряжений (кривая 3); кривой пределов выносливости (кривая 1). В результате упрочнения наблюдается рост допускаемого

максимального напряжения на поверхности материала. Его величина превышает исходный предел выносливости на значение $\Delta\sigma$, которое количественно характеризует эффект упрочнения. Это благоприятно по нескольким причинам: происходит уменьшение рабочих напряжений; из-за расположения пика меньших по величине напряжений на некоторой глубине от поверхности витка пружины зарождение усталостной трещины происходит в этой зоне, а не на поверхности витка и при большем числе циклов нагружения. У пружин, подвергнутых дробемётной обработке, очаг трещины всегда располагается под поверхностью, не выходя за неё.

Величина остаточных напряжений и глубина поверхностного слоя, на которой они действуют, определяется параметрами процесса (диаметр дроби, скорость потока дроби, направление потока относительно обрабатываемой поверхности витка пружины, время обработки) и прочностными характеристиками материала, в основном пределом текучести. Для нетермообработанных сталей глубина наклёпа может достигать 0,8...1 мм, а величина остаточных напряжения 400...500 МПа, у термообработанной пружинной стали глубина наклёпа – 0,15...0,35 мм, а величина остаточных напряжения – 1000...1200 МПа [3, 4].

Основным недостатком дробемётной обработки является зависимость эффективности упрочнения от конструкции пружин: у пружин с малым межвитковым зазором внутренняя поверхность витка не упрочняется, трещина зарождается на ней и влияние дробемётной обработки незначительно. Также после дробемётной обработки увеличивается релаксация напряжений.

Еще одним недостатком дробемётной обработки является недостаточная усталостная прочность пружин при высоких напряжениях. Так, в зоне малоциклового усталости при высоких напряжениях испытания долговечность пружин после дробемётной обработки почти сравнивается с долговечностью неупрочненных пружин (рисунок 2) [3].

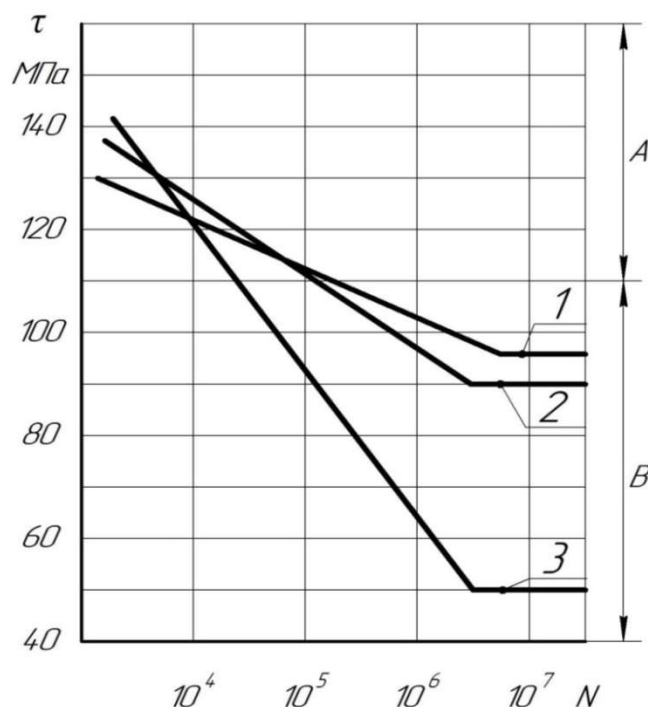


Рисунок 2 – Кривые выносливости пружин из патентированной проволоки $d = 2$ мм при коэффициенте асимметрии цикла $r = 0$: 1 – после дробемётной обработки в статически напряженном состоянии; 2 – после дробемётной обработки в свободном состоянии; 3 – без упрочнения; A – диапазон напряжений при скорости нагружения > 4 м/с; B – диапазон напряжений при скорости нагружения < 4 м/с

Для увеличения выносливости пружин, работающих при интенсивных, но кратковременных контактных нагрузках между витками, а также в условиях высоких скоростей нагружения и столкновений витков, следует применять метод контактного заневоливания [8].

Контактное заневоливание – это метод, при котором пружину сначала сжимают до

касания витков, а затем к ней прикладывают дополнительную осевую нагрузку. Эта нагрузка вызывает дальнейшее сжатие витков в месте контакта с усилием, которое превышает силу F_3 , необходимую для их первоначального соприкосновения. В итоге в зоне контакта витков образуются структуры из упрочненного металла, а на их поверхности и внутри возникают сложные остаточные напряжения. Эти напряжения становятся причиной осевой осадки пружины.

В исследовании [3] представлен метод упрочнения пружин заневоливанием в направлении действия рабочей нагрузки. При приложении к пружине усилия F_3 и последующем выдерживании в сжатом состоянии на протяжении 24...48 часов напряжения, возникающие на наружных волокнах, достигают предела текучести материала. В результате длительной выдержки на поверхности витков происходит релаксация напряжений [9]. После снятия нагрузки высота пружины уменьшается, её относительная остаточная деформация A , %, равна A_1 (рисунок 3), в пружине возникают остаточные напряжения, стремящиеся вернуть пружину в исходное состояние. Аналогичный эффект может быть достигнут посредством термоосадки пружины.

При увеличении осевой нагрузки до $10F_3$ и выше выдержка пружины для упрочнения составляет всего 1,5...2 с, а относительная остаточная деформация будет равна $A_2...A_3$. При дальнейшем увеличении осевой нагрузки произойдет разупрочнение пружины.

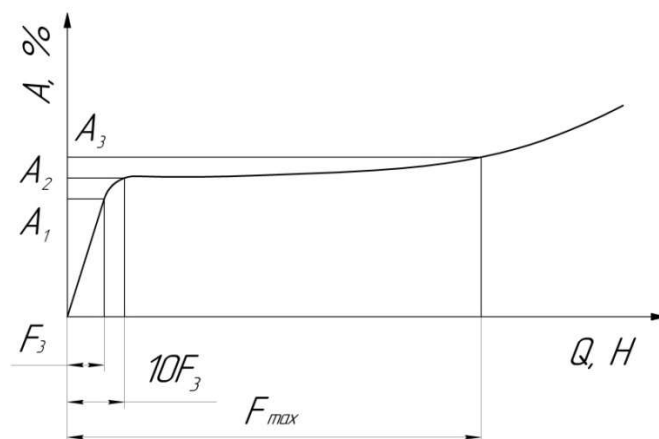


Рисунок 3 – График зависимости относительной остаточной деформации пружины от нагрузки контактного заневоливания: A – относительная остаточная деформация пружины, Q – нагрузка контактного заневоливания, F_{max} – максимальная нагрузка на пружину

Метод контактного заневоливания значительно уменьшает продолжительность производственного процесса. Применение его в производственных технологических процессах способствует стабилизации параметров пружин, эксплуатируемых в условиях повышенных нагрузок. Он стимулирует ускорение развития остаточных деформаций: процессов, традиционно отличающихся замедленным характером как при умеренных, так и при повышенных температурах. Это приводит к ощутимому росту долговечности пружин, подвергающихся воздействию контактных нагрузок.

Существует технология упрочнения пружин конической и параболоидной геометрии, включающая последовательность следующих операций: навивка заготовки с увеличенным шагом; термическая обработка; шлифование торцевых поверхностей; дробеструйную обработку; заневоливание; наклеп. При реализации метода используют проволоку, предварительно прошедшую упрочняющую обработку. Шаг навивки превышает допустимый параметр на 6...14 %. Процесс заневоливания предполагает сжатие пружины до полного смыкания витков и выдерживание в таком состоянии от 6 до 30 часов. Операция наклепа осуществляется методом штамповки: обрабатываются наружная и внутренняя поверхности, а также зоны контакта между витками. При этом пружина размещается в матрице узкой частью вниз. Ключевой параметр – зазор между матрицей и пуансоном должен быть меньше диаметра витка на 0,2...2 мм. Наклеп выполняется за счёт распирающего действия пуансона при

одновременном сжатии пружины с усилием в диапазоне $5...300 F_3$. Отдельные операции технологического процесса допускается проводить как совместно, так и в раздельном режиме.

Метод демонстрирует недостаточную эффективность в случае пружин конической или параболической формы, характеризующихся особым типом деформации: при максимальном сжатии их витки вступают в плотный контакт, а высота конструкции выравнивается с диаметром витка. Данная особенность геометрии в деформированном состоянии создаёт ограничения для применения технологии, указывая на потребность в её модернизации.

В целях увеличения эксплуатационного ресурса конических и параболоидных пружин, витки которых при максимальном сжатии входят друг в друга, при этом высота сжатых пружин равна диаметру их витка, авторы предложили способ [11] включающий навивку пружины из предварительно упрочненной или закаливаемой проволоки с увеличенным шагом на величину припуска под заневоливание и штамповку, составляющим $6...14\%$ от высоты готовой пружины. Далее следует термообработка, включающая отпуск для пружин из предварительно упрочненной проволоки или закалку и последующий отпуск для пружин из закаливаемой проволоки. После этого проводится люминесцентный контроль, шлифовка торцов со снятием на них фасок, а также дробемётная обработка. Затем осуществляется 6-часовое заневоливание пружины под нагрузкой F_3 . После этого производится наклёп посредством штамповки с использованием вкладыша пуансона и матрицы устройства [12] по линии контакта витков пружины с последующим сжатием усилием в диапазоне от 5 до $300 F_3$. Завершающим этапом является нанесение защитного покрытия. В процессе заневоливания пружина устанавливается на матрицу большим диаметром в направлении вниз.

Предлагаемый способ обладает следующими преимуществами относительно аналогов:

- 1) витки и поверхность пружины упрочняются в сжатом состоянии всего за одну технологическую операцию;
- 2) упругие свойства пружин остаются максимально стабильными;
- 3) процесс упрочнения пружин отличается высокой скоростью выполнения.

Для реализации предложенного способа рекомендуется использовать устройство изображенное на рисунке 4 [12].

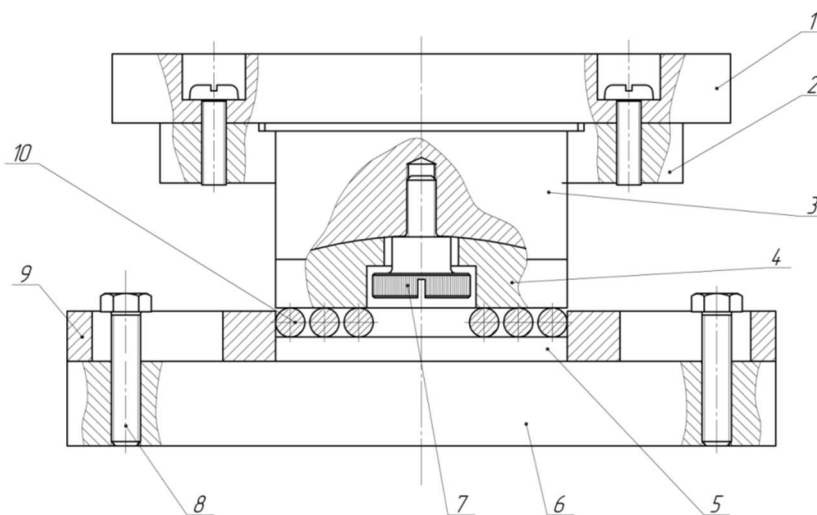


Рисунок 4 – Устройство по патенту RU 2763910

Конструктивно устройство включает две базовые плиты: верхнюю (поз. 1) и нижнюю (поз. 6). На верхней плите смонтирован пуансонодержатель (поз. 2), к которому жёстко закреплён пуансон (поз. 3) со сферической рабочей поверхностью. Данная поверхность контактирует со сферическим профилем верхнего вкладыша (поз. 4). Особенность кинематики заключается в следующем: нижний вкладыш (поз. 5) имеет возможность вращения относительно оси пуансона (поз. 3); верхний вкладыш (поз. 4) способен как вращаться, так и перемещаться вдоль оси пуансона. Соединение верхнего вкладыша с пуансоном реализовано посредством ступенчатого винта (поз. 7), при этом между винтом и вкладышами

предусмотрены минимальные технологические зазоры. На нижней плите (поз. 6) размещён нижний вкладыш (поз. 5), а также закреплены регулируемые упоры (поз. 9), оснащённые овальными отверстиями для болтов (поз. 8). Регулировка положения упоров позволяет точно совместить ось обрабатываемой пружины (поз. 10) с осями обоих вкладышей. Обрабатываемая пружина располагается в пространстве между вкладышами и упорами.

Существенное преимущество данной конструкции перед аналогами – способность эффективно упрочнять поверхности витков пружин сжатия конической или параболоидной формы. При максимальном сжатии витки таких пружин взаимопроникают, а общая высота сжатой пружины становится эквивалентной диаметру одного витка.

В целях проверки полученных решений на соответствие промышленной применимости разработана структурная схема (рисунок 5) дальнейших теоретических и экспериментальных исследований направленных на разработку технологии изготовления конических (или параболоидных) пружин.

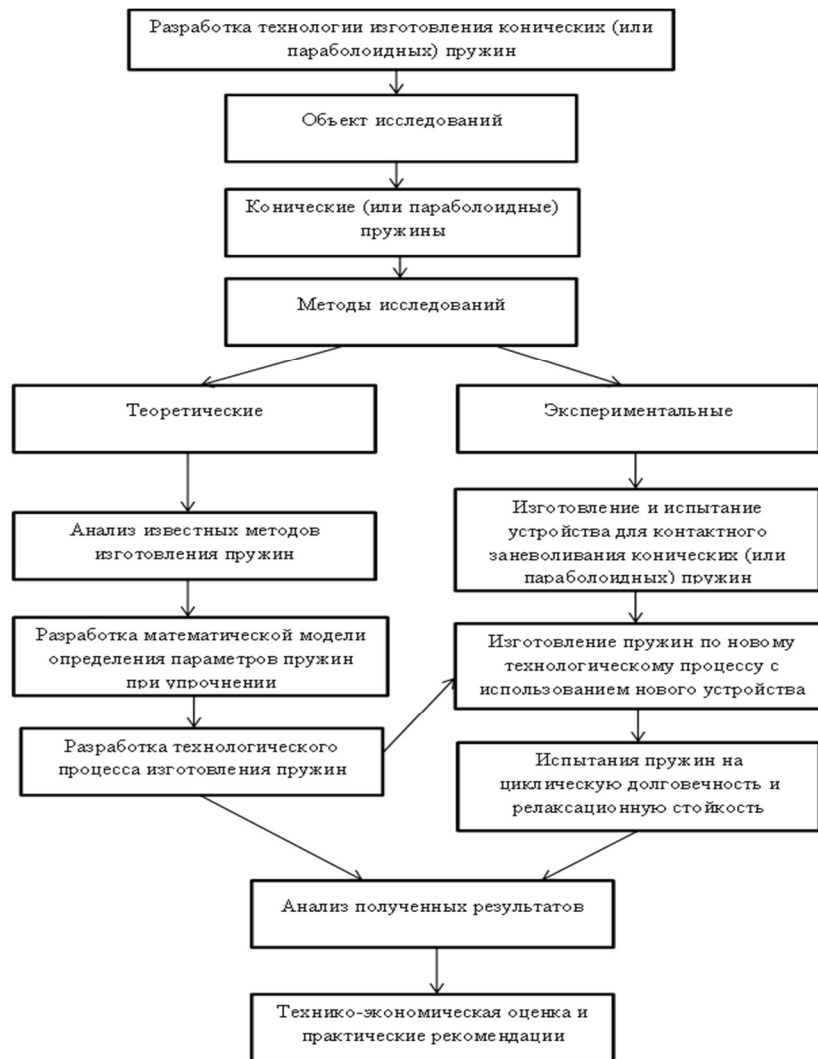


Рисунок 5 – Структурная схема теоретических и экспериментальных исследований по патентам RU 2763910 и RU 2801176

Заключение

Совершенствование технологий и оборудования для упрочнения конических и параболоидных пружин сжатия открывает возможности повышения их эксплуатационных характеристик. Предложенные инновационные решения и новое устройство являются фундаментом для создания новых технологических процессов производства данных изделий. Их целесообразно внедрять на предприятиях таких отраслей, как оборонно-промышленный комплекс, машиностроение, авиационная и автомобильная промышленность, сельхозтехника,

а также в сервисных организациях, специализирующихся на ремонте и техобслуживании оборудования с пружинами указанных форм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин Г.А. Направления совершенствования технологий изготовления пружин ответственного назначения / Г.А. Данилин, Е.Ю. Ремшев, Е.С. Воронина, М.Ю. Силаев // Металлообработка. Санкт-Петербург: Политехника, 2014. № 3(81). С. 16-21.
2. Муравьев Д. В. Математическое моделирование упрочняющей термической обработки винтовых пружин подвижного состава / Д.В. Муравьев, А.В. Обрывалин // Транспорт Урала. Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2024. № 2(81). С. 22-28.
3. Шаврин О.И. Производство высокопрочных винтовых пружин: монография / О.И. Шаврин. Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2019. – 196 с.
4. Лавриненко Ю.А. Упрочнение пружин / Ю.А. Лавриненко, Е.Г. Белков, В.В. Фадеев. Уфа: Изд. Дом «Бизнес-Партнёр», 2002. – 124 с.
5. Землянушнов Н.А. Исследование управляемого формирования упругого ядра пружин сжатия при упрочнении дробемётной обработкой и контактным заневоливанием / Н.А. Землянушнов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2023. № 5(361). С. 21-29.
6. Землянушнов Н.А. Совершенствование способа и устройства для упрочнения пружин конической формы или формы параболоида вращения / Н.А. Землянушнов, Н.Ю. Землянушнова, Ю.М. Тебенко // Упрочняющие технологии и покрытия. Москва: Инновационное Машиностроение, 2021. Т. 17, № 8(200). С. 360-367.
7. Остроумов В.П. Производство винтовых цилиндрических пружин / В.П. Остроумов. Москва: Машиностроение, 1970. – 135 с.
8. Тебенко Ю.М. Применение контактного заневоливания для изготовления пружин откатных механизмов / Ю.М. Тебенко // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. Москва: Научно-технический центр оборонного комплекса «КОМПАС», 2018. № 3(139). С. 16-24.
9. Тебенко Ю.М. Проблемы производства высокоскоростных пружин и пути их решения / Ю.М. Тебенко. Ставрополь: ООО «Мир данных», 2007. – 152 с.
10. Пат. 2728332 С1 Российская Федерация, МПК В21F 35/00, F16F 1/08. Способ упрочнения конических и параболоида вращения пружин / Тебенко Ю.М., Землянушнова Н.Ю., Землянушнов Н.А.; заявитель и патентообладатель: Тебенко Ю.М., № 2019134592; заявл. 28.10.2019; опубл. 29.07.2020, Бюл. № 22. 9 с.
11. Пат. 2801176 С1 Российская Федерация, МПК В21F 35/00, F16F 1/08. Способ упрочнения высоконагруженных пружин конической или параболоида вращения форм, витки которых при максимальном сжатии входят друг в друга / Землянушнов Н.А., Землянушнова Н.Ю., Тебенко Ю.М.; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»; № 2022110247; заявл. 15.04.2022; опубл. 02.08.2023, Бюл. № 22. 8 с.
12. Пат. 2763910 С1 Российская Федерация, МПК В21F 35/00. Устройство для контактного заневоливания конических пружин / Землянушнов Н.А., Землянушнова Н.Ю., Тебенко Ю.М.; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», № 2021118123; заявл. 22.06.2021; опубл. 11.01.2022, Бюл. № 2. 8 с.

Землянушнов Никита Андреевич

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь
Кандидат технических наук, доцент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования института перспективной инженерии
355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
Тел.: +7 (8652) 95-68-08
E-mail: nikita3535@mail.ru

Землянушнова Надежда Юрьевна

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь
Кандидат технических наук, доцент, доцент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования института перспективной инженерии
355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
Тел.: +7 (8652) 95-68-08
E-mail: zemlyanushnova@rambler.ru

ZEMLYANUSHNOV N.A., ZEMLYANUSHNOVA N.Y.

IMPROVEMENT THE HARDENING METHOD FOR HIGHLY LOADED CONICAL AND PARABOLOID SPRINGS

Annotation. Existing methods of strengthening springs are not applicable to increase the durability of springs of conical or parabolic shape, the coils of which enter each other at maximum compression, in the case in which the

height of the compressed spring is equal to the diameter of its coil. This is due to differences in the geometry of the springs in the compressed state, which requires the use of alternative hardening methods. A new method has been proposed, the advantage of which is to provide the technical possibility of creating plastic deformations by riveting on the surfaces and in the coils of these springs.

Keywords: *method, device, finite element method, residual stresses, durability, hardening, conical spring, paraboloid spring.*

BIBLIOGRAPHY

1. Danilin G.A. Directions for improving technologies for manufacturing springs for responsible purposes / G.A. Danilin, E.Y. Remshev, E.S. Voronina, M.Y. Silaev // *Metalloobrabotka*. Saint Petersburg: Polytechnic, 2014. No. 3(81). pp. 16-21.
2. Muravyov D. V. Mathematical modeling of the strengthening thermal treatment of helical springs of rolling stock / D.V. Muravyov, A.V. Obryvalin // *Transport of the Urals*. Yekaterinburg: Ural State University of Railway Transport, 2024. No. 2(81). pp. 22-28.
3. Shavrin O.I. Production of high-strength coil springs: a monograph / O.I. Shavrin. Izhevsk: Publishing house of IzhSTU named after M.T. Kalashnikov, 2019. – 196 p.
4. Lavrinenko Yu.A. Hardening of springs / Yu.A. Lavrinenko, E.G. Belkov, V.V. Fadeev. Ufa: Ed. Business Partner House, 2002– 124 p.
5. Zemlyanushnov N.A. Investigation of the controlled formation of the elastic core of compression springs during hardening by shot blasting and contact hardening / N.A. Zemlyanushnov // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. Eagle: I.S. Turgenev OSU, 2023. No. 5(361). pp. 21-29.
6. Zemlyanushnov N.A. Improvement of the method and device for hardening the plates of a conical shape or the shape of a paraboloid of rotation / N.A. Zemlyanushnov, N.Yu. Zemlyanushnova, Yu.M. Tebenko // *Hardening technologies and coatings*. Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2021. Vol. 17, No. 8(200). pp. 360-367.
7. Ostroumov V.P. Production of helical cylindrical springs / V.P. Ostroumov. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. 135 p.
8. Tebenko Yu.M. Application of contact sealing for the manufacture of springs of sliding mechanisms / Yu.M. Tebenko // *The defense complex is a scientific and technical resource of Russia*. Moscow: Scientific and Technical Center of the defense complex "COMPASS", 2018. № 3(139). Pp. 16-24.
9. Tebenko Yu.M. Problems of production of high-speed springs and ways to solve them / Yu.M. Tebenko. Stavropol: OOO "World of Data", 2007. 152 p.
10. Pat. 2728332 C1 Russian Federation, IPC B21F 35/00, F16F 1/08. Method of hardening conical and paraboloid rotating springs / Tebenko Yu.M., Zemlyanushnova N.Y., Zemlyanushnov N.A.; applicant and patent holder: Tebenko Yu.M., No. 2019134592; published on 28.10.2019; published on 29.07.2020, Bul. No. 22. 9 p.
11. Pat. 2801176 C1 Russian Federation, IPC B21F 35/00, F16F 1/08. A method for strengthening highly loaded springs of conical or paraboloid rotation shapes, the coils of which enter each other at maximum compression / Zemlyanushnov N.A., Zemlyanushnova N.Y., Tebenko Yu.M.; applicant and patent holder: FGAOU VO "North Caucasus Federal University": No. 2022110247; application 04/15/2022; publ. 08/02/2023, Byul. no. 22. 8 p.
12. Pat. 2763910 C1 Russian Federation, IPC B21F 35/00. A device for contact actuation of conical springs / Zemlyanushnov N.A., Zemlyanushnova N.Yu., Temenko Yu.M.; applicant and patent holder: FGAOU VO "North Caucasus Federal University", No. 2021118123; application. 06/22/2021; publ. 11.01.2022, Bul. № 2. 8 p.

Zemlyanushnov Nikita Andreevich

North Caucasus Federal University, Stavropol
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of
Functional Materials and Engineering Design Department
of Advanced Engineering Institute
355017, Russia, Stavropol, Pushkin str., 1
Tel.: +7 (8652) 95-68-08
E-mail: nikita3535@mail.ru

Zemlyanushnova Nadezhda Yurievna

North Caucasus Federal University, Stavropol
Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate
Professor of Functional Materials and Engineering Design
Department of Advanced Engineering Institute
355017, Russia, Stavropol, Pushkin str., 1
Tel.: +7 (8652) 95-68-08
E-mail: zemlyanushnova@rambler.ru

© Землянушнов Н.А., Землянушнова Н.Ю., 2026

БОГУЦКИЙ В.Б., ШРОН Л.Б.

РАСЧЕТ НАСТРОЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ-АВТОМАТАХ И АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ

Аннотация. Выполнен анализ методик выбора настроечного размера при многоинструментальной обработке на токарных станках автоматах. Предложен метод расчета настроечных размеров, основанный на обеспечении рационального расположения границ поля рассеивания реальных производственных погрешностей, входящих в поле допуска и гарантирующий изготовление максимально большей партии годных деталей после наладки. На основе анализа реальных технологических процессов показано, что структурные составляющие рассматриваемой схемы являются общими не только для токарных автоматов и полуавтоматов, но могут быть использованы при многоинструментальной обработке на станках с ЧПУ. Такой подход необходим для того, чтобы получить заданный размер детали, находящийся в непосредственной близости от требуемой границы поля допуска. Сделан вывод, что при многоинструментальной обработке выбор настроечного размера должен осуществляться из группы размеров, которые отражают реальные силовые схемы.

Ключевые слова: многоинструментальная обработка, точность обработки, наладка инструментов, погрешность настройки инструментов, настроечный размер, поле допуска, замыкающее звено.

Введение

Точностные расчеты, связанные с определением настроечных размеров, имеют важное значение при применении взаимозаменяемой наладки инструментов. При обработке деталей на токарных автоматах и полуавтоматах пока широко применяется метод настройки режущих инструментов с помощью эталонной детали. Проверка результатов настройки производится пробной обработкой деталей с последующим измерением размеров обработанных поверхностей. Этот метод требует значительных затрат времени и служит одной из причин брака, получаемого в процессе настройки. [1-8 и др.].

Основная часть

В данной работе на основе теоретического анализа и проведенных экспериментальных исследований точности обработки применительно к токарным полуавтоматам, как отдельным, так и соединенным в автоматические линии, излагается метод аналитического определения оптимальных размеров.

Предлагаемый метод является предпосылкой настройки токарного автоматического оборудования, обеспечивающей изготовление возможно большей партии деталей после наладки, за счет рационального расположения границ поля рассеивания производственных погрешностей в поле допуска. В основу методики расчета настроечных размеров принята единая технологическая схема их образования (см. рисунок 1) на примере образования линейного размера при токарной обработке (отнесенная к началу процесса), которая учитывает δ_y – погрешность установки детали в приспособлении, которая делится на две составляющих: систематическую и случайную r [9-13 и др.]. Такое деление вызывается особенностями суммирования рассматриваемых величин таких как: звенья размерных цепей, определяющих настроечный размер; погрешность установки приспособления – C , возникающих при замене или изменении его положения относительно технологических баз; исходный размер детали – A , определяемый как минимальный для охватываемых размеров и максимальный для охватывающих.

Ниже рассматривается пример получения охватываемого размера. Для получения такого размера следует учитывать следующие параметры: $A_{\min}$ – наименьший предельный размер; $y_{\min}$ – минимальное отжатие технологической системы, вызываемое действующими силами, соответствующими минимальному припуску и наименьшей твердости обрабатываемого материала при остром инструменте; H_{cp} – среднее значение высот неровностей, соответствующее обработке острым резцом, которое определяет погрешность, учитывающую разницу в положении режущей кромки инструмента и поверхности отсчета при измерении; t_1 – температурная погрешность в начале процесса; $a_{н.н}$ – погрешность настройки инструментов на размер, зависящая от точности средств измерения при ее выполнении и конструктивных особенностей устройств крепления режущих инструментов; r_1 – поле

рассеивания размеров характерное для данного метода обработки, выраженное в виде случайных погрешностей как отклонений первичных погрешностей от минимальных значений (зависящих от колебаний припуска, твердости материала, температурных факторов и податливости системы в начале обработки); X – часть поля рассеивания размеров, которая не учитывается при суммировании. Количественное значение ее определяется по вероятностной оценке случайных погрешностей и интегральной функции Гауссова закона [14-19].

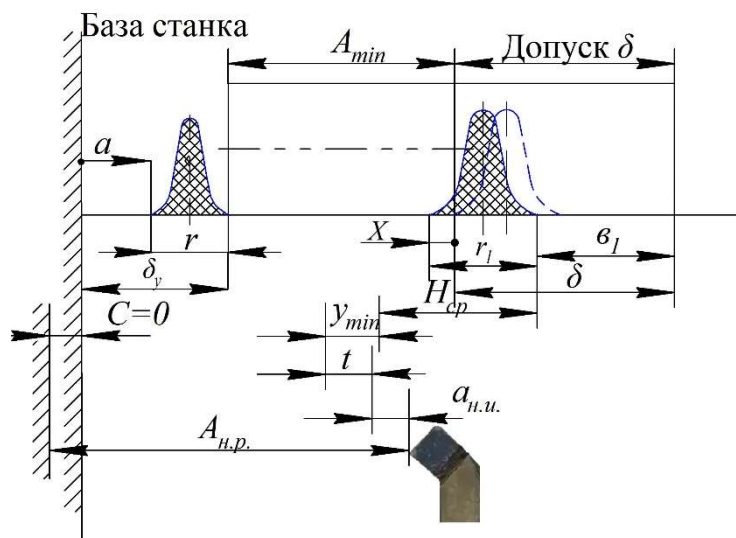


Рисунок 1 – Схема образования настроечных размеров

Такое распределение погрешностей, при построении рассматриваемой схемы, отличается от обычно принятого в литературе. В то же время такой подход оправдывается тем, что минимальные значения погрешностей удастся выделить как самостоятельные величины, рассматривая их как систематические погрешности. При этом действительное изменение первичных погрешностей можно учесть статическим методом в виде кривой мгновенного рассеивания с полем рассеивания r .

Известно, что доминирующей погрешностью при токарной обработке является погрешность, связанная с податливостью системы [19-22 и др.]. При полуставовой обработке припуск в начальный период после настройки колеблется в пределах допуска предшествующей операции. В этой связи значение случайной погрешности по сравнению с систематической, зависящей от колебаний минимального припуска, будет малой величиной. То же можно сказать и о других структурных составляющих.

Как показал анализ реальных технологических процессов, структурные составляющие рассматриваемой схемы являются общими для токарных автоматов и полуавтоматов. Для получения этих составляющих проведены экспериментальные исследования на токарных одношпиндельных полуавтоматах. При обработке колец с установкой заготовок в трехкулачковом рычажном патроне с пневматическим приводом показано, что при изменении давления в пределах 0,405...0,658 МПа составляющие величины δ_y возрастают с увеличением давления в сети: a менялась в пределах 0,06...0,11 мм, а параметр r характеризуется $\sigma=0,007...0,058$.

На основании структурной схемы (рисунок 1) напишем уравнение размерной цепи, из которого значение настроечного размера выразим в виде

$$A_{н.р.} = \delta_y + A_{\min} - X - r_l - H_{cp} - y_{\min} + t + a_{н.и.} \quad (1)$$

При многоинструментальной обработке встречаются случаи, когда между двумя или несколькими размерами прослеживается взаимосвязь, например, размеры A , A_1 и A_2 (рисунок 2).

В реальных производственных условиях в операционных картах можно встретить следующие альтернативные комбинации получаемых размеров:

- обработка поверхностей 1 и 2 выполняется для получения размеров A_1 и A_2 .
- обработка поверхностей 1 и 2 выполняется для получения размеров A_2 , A или A_1 , A .

– При последовательной подрезке торцовых поверхностей 1, 2 (рисунок 2), например, с применением жестких упоров, механизм, определяющий линейные размеры A_1 и A_2 одинаков, и они подчиняются уравнению (1).

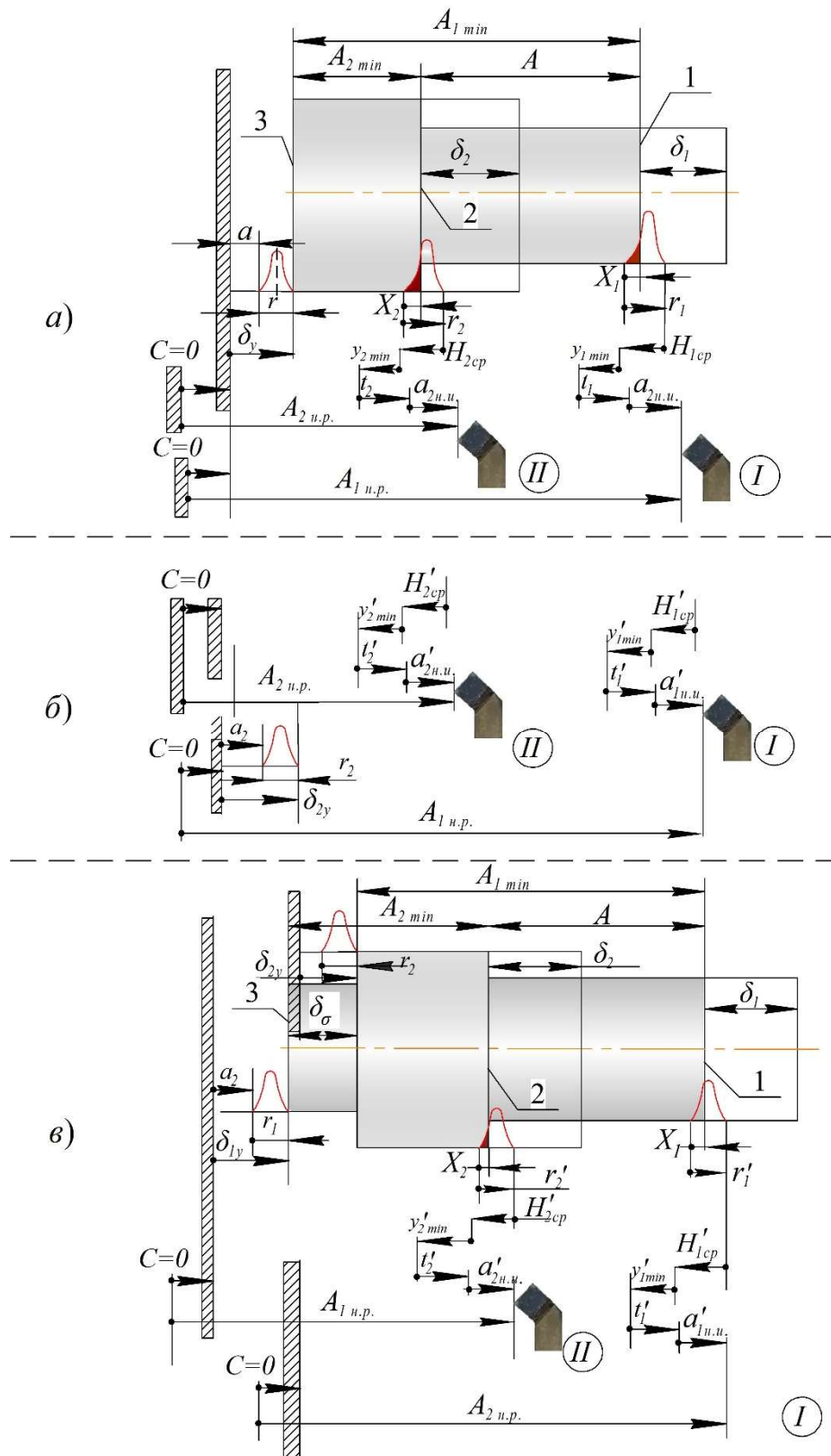


Рисунок 2 – Схема образования размеров при одностороннем расположении инструментов:
а – обработка с одной установки; б – обработка с двух установок по одной установочной поверхности; в – обработка с двух установок по различным установочным поверхностям

Учитывая, что величина A является замыкающим звеном технологической размерной цепи включающей все составляющие размеров A_1 и A_2 , значение $A = A_1 - A_2$ можно определить по формуле

$$A = (A_1 - A_2) - (r_1 - r_2) + (H_{1cp} + H_{2cp}) + (y_{1min} - y_{2min}) - (t_1 - t_2) - (a_{1н.у} - a_{2н.у}). \quad (2)$$

В случае одновременной работы установленных в жесткий блок нескольких инструментов, разность их отжатый можно считать несущественной и считать что $y_{1min} = y_{2min}$; $r_1 = r_2$; H_{2cp} и $t_1 = t_2$. Тогда получим уравнение

$$A = (A_1 - A_2) - (a_{1н.у} - a_{2н.у}). \quad (3)$$

Зависимость (3) показывает, что если не учитывать жесткость инструмента, то в условиях многоинструментальной обработки точность взаимосвязанного с размерами A_1 и A_2 размера A определяется только точностью настройки режущих инструментов.

Выполненный анализ разнообразных схем многоинструментных наладок, показал что размеры, по признаку их образования, могут быть отнесены к одной из трех групп.

Группа I. Зависимые размеры A_1 , A_2 , когда точность этих величин обусловлена суммарными ошибками, присущими методам обработки и способам установки.

Группа II. Размеры A , которые коррелируют друг с другом и при этом не зависят от указанных погрешностей.

Группа III. Размеры, определяемые размерами инструментов (например, прорезными или фасонными резцами) и характеризующиеся относительной стабильностью.

Группа III в приведенных схемах не анализировалась, и при условии, соответствующем формуле (3), ее можно не выделять в самостоятельную группу.

В практических технологических процессах обработки, размеры группы II, определяемые характером взаимосвязей между установочными элементами станка, технологической оснастки и установочными поверхностями детали, могут быть классифицированы на три подгруппы

II.1. Находящиеся в корреляционной зависимости друг от друга размеры поверхностей 1 и 2, задаются относительно поверхности 3 и обрабатываются за одну установку;

II.2. Взаимосвязанные размеры поверхностей 1 и 2 обрабатываются за две установки, используя одну и ту же установочную поверхность 3 в качестве базы на каждой операции;

II.3. Взаимосвязанные размеры поверхностей 1 и 2 обрабатываются с двух или более установок с использованием разных установочных поверхностей 3, 4 в различных операциях.

Рассмотрим группы образования размеров применительно к трем указанным способам установки. Анализ рисунка 2 показывает, что первая группа образования размеров, а именно зависимые размеры, характеризуется наличием структурных составляющих, независимо от выбранного способа установки. Математическое описание этих составляющих рассмотрены выше.

Уравнение размеров группы II (связанные размеры) корректируется с учетом характера погрешности установки, которая может быть несущественной, комплексной (сочетающей две погрешности установки) или включать в себя погрешность базирования. Следовательно, настроечные размеры для группы II будут определяться следующим образом:

– для первого способа установки (рисунок 2, а)

$$A = (A_{1min} - A_{2min}) - (X_1 - X_2) + (r_1 + r_2) - (H_{1cp} - H_{2cp}) - (y_{1min} - y_{2min}) + (t_1 - t_2) + (a_{1н.у} - a_{2н.у}). \quad (4)$$

– для второго способа установки (рисунок 2, б)

$$A = (A_{1min} - A_{2min}) - (X_1 - X_2) + (r_1 - r_2) - (H_{1cp} - H_{2cp}) - (y_{1min} - y_{2min}) + (t_1 - t_2) + (a_{1н.у} - a_{2н.у}) + (\delta_{2y} - \delta_{1y}). \quad (5)$$

– для третьего способа установки (рисунок 2, в)

$$A = (A_{1min} - A_{2min}) (X_1 - X_2) + (r_1 - r_2) - (H_{1cp} - H_{2cp}) - (y_{1min} - y_{2min}) + (t_1 - t_2) + (a_{1н.у} + a_{2н.у}) + (\delta_{2y} - \delta_{1y}) + \delta_{\sigma}. \quad (6)$$

Формулы (4...6) наглядно показывают, что независимо от выбранного метода установки, для взаимосвязанных размеров структура настроечных остается неизменной. По

сути, их отличают только погрешности, возникающие при установке детали: $\delta_y = 0$ – для первого способа, $\delta_y = \delta_i$ – для второго способа (определенное значение) и в третьем случае в погрешности установки учитывается и погрешность базирования δ_6 , зависящая от взаимного расположения установочных поверхностей. Следует отметить что погрешность базирования δ_6 является комплексной погрешностью, включающей в себя как погрешность обработки на предыдущих операциях, так и погрешность установки на текущей.

Анализ реальных технологических процессов, позволяет выделить несколько схем взаимного расположения инструментов относительно обрабатываемых поверхностей: одностороннее расположение (рисунок 2), двухстороннее, охватывающее и охватываемое (последние виды в статье не рассматривались).

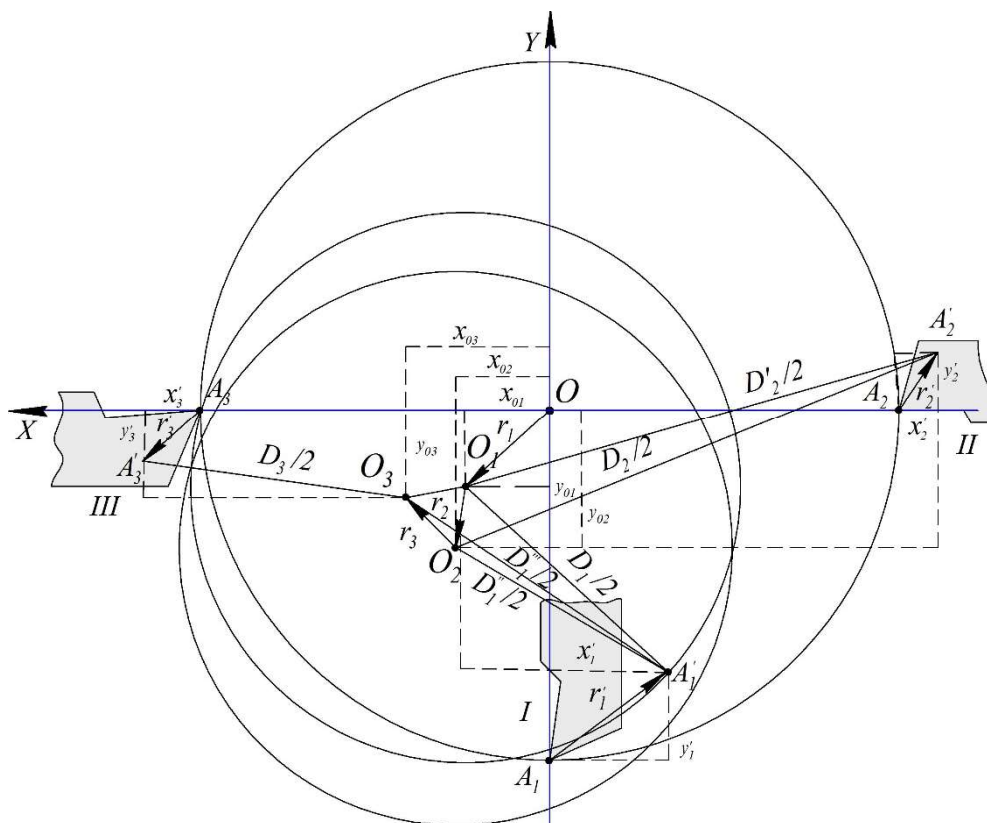


Рисунок 3 – Схема изменения настроечных размеров при перемещениях элементов технологической системы, вызванных силами резания.

Выполнение по предлагаемой методике анализа возможных комбинаций групп получаемых размеров и вариантов взаиморасположения режущих инструментов по отношению к обрабатываемой детали, дает возможность установить структурные компоненты погрешностей реализуемых схем обработки и для каждой из них решить задачу определения величины оптимального настроечного размера.

Структура составляющих погрешностей при многоинструментальной работе с нескольких суппортов остается неизменной, за исключением погрешности, связанной с податливостью системы. В связи с этим рассмотрим подробно влияние последней на механизм образования размеров при обработке на одношпиндельном токарном полуавтомате с учетом очередности работы резцов установленных на трех суппортах и перемещающихся в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рисунок 3).

При этом выдерживается последовательность работы резцов, указанная в циклограмме (рисунок 4). Исходным условием (до начала работы) является то, что расстояние OA_1 , измеряемое в начальной точке от вершины резца до оси заготовки, определяет размер настройки. На начальной стадии, первым в работу включается резец I. Возникающая при резании сила смещает положение оси шпинделя O и она занимает положение O_1 при этом

вершина резца которая находилась в точке A_1 перемещается в точку A'_1 и, соответственно, отрезок OA'_1 будет радиусом обрабатываемого отверстия.

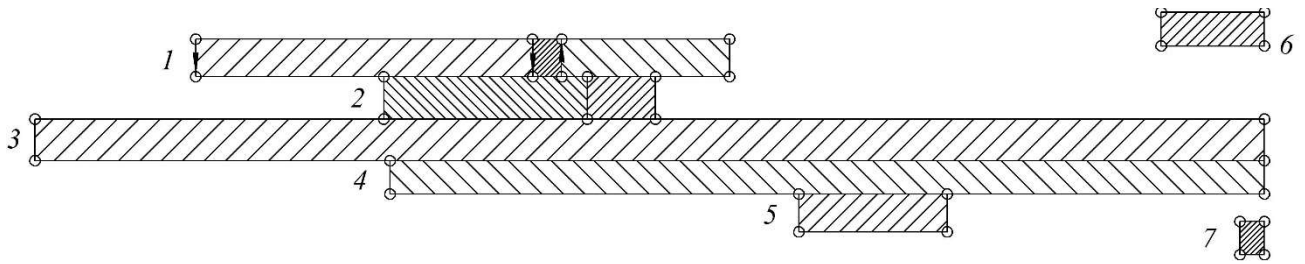


Рисунок 4 – Циклограмма работы полуавтомата при обработке колец:

1 – подрезка торца; 2 – подрезка торца буртика; 3 – расточка внутренней цилиндрической поверхности; 4 – обточка конической поверхности; 5, 6, 7 – обработка фасок

Для указанной в технологической карте величине диаметра необходимо решить задачу установления величины настроечного размера. С этой целью, смещения вершины режущего инструмента и оси шпинделя, изобразим как отрезки, а их проекции расположим в плоскости, перпендикулярной оси детали на осях X и Y .

Согласно схемы, показанной на рисунке 3, настроечный размер можно рассчитать как:

$$A_{1н.р} = OA_1 = \sqrt{\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - (x_{01} - x'_1)^2} + y_{01} + y'_1 \quad (7)$$

$$y_{01} = \frac{R_y}{j_b}; \quad x_{01} = \frac{R_x}{j}; \quad y'_{01} = \frac{P_y}{j_b}; \quad x'_{01} = \frac{P_z}{j_2}.$$

где y_{01} , y'_1 , x_{01} , x'_1 – проекции величин перемещения вершин режущих инструментов и оси шпинделя соответственно на оси Y и X ; R_y , R_x – сумма проекций сил.

Показано, что схема действующих в процессе обработки сил смещается в сторону оси детали. Таким образом, при стабильной величине жесткости системы или малой длине обрабатываемой поверхности, настроечный размер действующего в текущий момент времени инструмента не изменяется до тех пор, пока в работу не вступает следующий (в нашем случае резец II или резец III).

В момент начала работы следующего инструмента ось шпинделя занимает положение O_2 или O_3 , а вершина предыдущего инструмента, если не учитывать изменения сил резания, вызванных колебаниями размера снимаемого припуска, останется в положении A'_1 .

Тогда, коррекция схемы действующих сил делает возможным видоизменить вычисленный ранее размер $A_{1н.р}$, который приобретет значения

$$A''_{1н.р} = \sqrt{\left(\frac{D''_1}{2}\right)^2 - (x_{01} + x'_1)^2} + y'_1 + y_{02}, \quad (7a)$$

$$A'''_{1н.р} = OA_1 = \sqrt{\left(\frac{D'''_1}{2}\right)^2 - (x_{03} - x'_1)^2} + y'_1 + y_{03}. \quad (7б)$$

Подобно тому, как было описано выше, настроечный размер для резцов, которые отвечают требуемым характеристикам D_2 , D_3 и будут задействованы при последующих смещениях оси детали, вычисляются по зависимостям

$$A_{2н.р} = OA_2 = \sqrt{\left(\frac{D_2}{2}\right)^2 - (y_{02} + y'_1)^2} - x_{02} - x'_2, \quad (8)$$

$$A_{3н.р} = OA_3 = \sqrt{\left(\frac{D_3}{2}\right)^2 - (y_{03} + y'_3)^2} - x_{03} - x'_3, \quad (9)$$

С целью упрощения анализа реальных схем сил резания, действующих в реальных производственных условиях, затраты времени на выполнение рабочих ходов инструментов

при выполнении цикла полуавтомата (или автомата) целесообразно отнести к продольному перемещению одного, работающего в непрерывном режиме, инструмента. На рисунке 4 показана очередность начала работы режущих инструментов для рассматриваемого примера.

Для получения подробной картины динамики изменений диаметра отверстия кольца связанных с изменениями в силовой схеме, настроечные размеры рассчитывались с дискретностью 0,5 мм. Расчеты проводились с учетом колебания глубины резания при условиях стабильной жесткости, что является допустимым для изготовления деталей типа «кольцо». Профилограмма формы внутренней поверхности кольца, построенная на основе расчетных данных для приведенного примера (рисунок 5, а), демонстрирует высокую степень соответствия экспериментальным данным, полученным в ходе обработки партии деталей (рисунок 6).

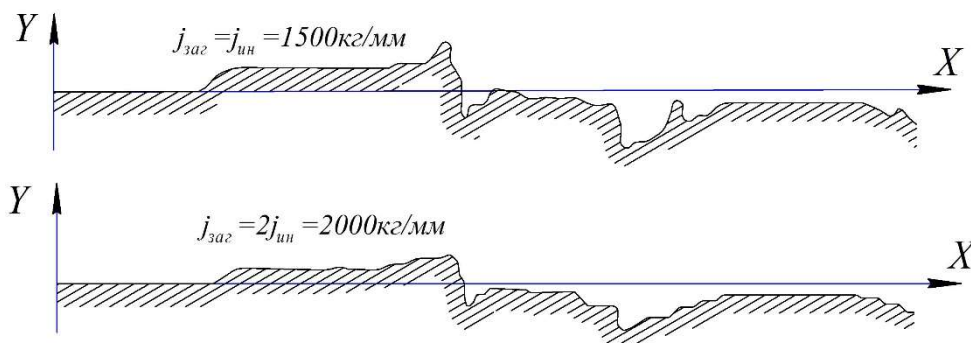


Рисунок 5 – Расчетная профилограмма по длине кольца

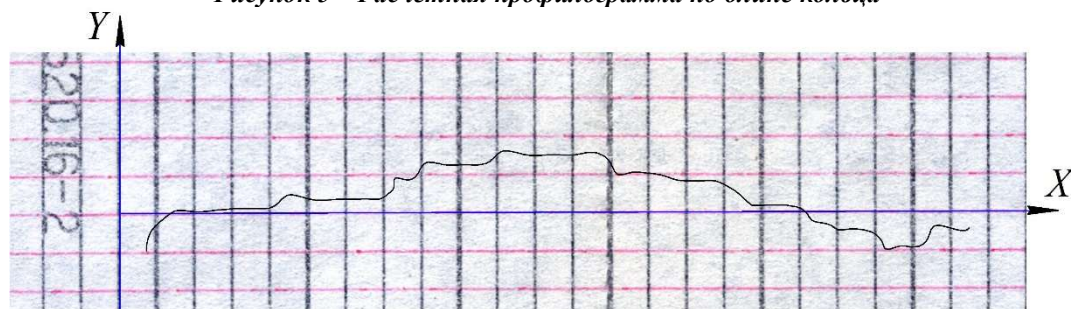


Рисунок 6 – Экспериментальная профилограмма по длине кольца

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что при многоинструментальной обработке выбор настроечного размера должен осуществляться из группы размеров, которые отражают реальные силовые схемы. Такой выбор необходим для того, чтобы получить заданный размер детали, находящийся в непосредственной близости от требуемой границы поля допуска (для внутренних диаметров это означает приближение к максимально допустимому размеру).

По литературным данным и приведенным расчетам, усилия резания, действующие в направлении, перпендикулярном плоскости образования размера, оказывают незначительное влияние на точность обработки, которой в практических расчетах можно пренебречь. Профилограмма поверхности отверстия (рисунок 5, 6), построенная без учета сил, действующих в указанном направлении, отличается от первой очень незначительно. Следовательно, в производственных условиях в отдельных случаях с достаточной степенью точности можно производить анализ силовых схем и точностные расчеты, учитывая только силы резания, действующие в плоскости образования размера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированное проектирование оптимальных наладок металлорежущих станков/ А.М. Гильман, Г.В. Гостев, Ю.Б. Егоров, Ю.В. Ясаков. М.: Машиностроение, 1984. 168 с.
2. Юсубов Н.Д., Аббасова Х.М. Систематика многоинструментных наладок на станках токарной группы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2024. Т. 26. № 4. С. 92–111.
3. Шишкин В. Н., Шевченко А. В. Эффективность автоматической размерной подналадки токарно-револьверных станков//Технология и автоматизация машиностроения Киев. 1984. № 33. С. 91–94.

4. Brecher C., Esser M., Witt S. Interaction of manufacturing process and machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2009. Vol. 58(2). S. 588-607.
5. Истомин А.Б., Гемба И.Н., Лизунов И.В. Многоинструментальная обработка в условиях комплексной автоматизации техпроцессов. // Главный механик. 2021. № 7. С. 24 – 31.
6. Кораблев П.А., Купцов С.Г., Панков Г.В. Двухсуппортная токарная обработка. Уфа: Башкириядат, 1968. 63 с.
7. Anikeeva O.V., Ivakhnenko A.G., Erenkov O.Yu. Modeling the Influence of Geometric Errors of Turning Machine for Accuracy Machinable Surface.// Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. S. 1127-1132.
8. Ладыгина А. В. Особенности обработки мелкогабаритных деталей на автоматах продольного точения с числовым программным управлением // Исследования наукограда. 2013. № 1 (3). С. 22-25.
9. K.M. Muditha Dassanayake, Chengri Cui, Masaomi Tsutsumi. Accuracy evaluation method for multitasking turning center / International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems. 2011. Vol. 4(3/4). S. 285-303.
10. Кольцов А.Г. Методика построения математической модели точности обработки с учетом геометрических, кинематических и динамических факторов//ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК. 2014. № 1. (127). С.96-100.
11. Manikandan H., Bera T.C. A turning simulation environment for geometric error estimation of thin-walled parts// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2022. Vol. 119. S. 789–809.
12. Юсубов Н.Д. Обобщение теории точности токарной обработки. Моногр. Баку: Эльм. 2007. 362 с.
13. Богуцкий В.Б., Шрон Л.Б. Оценка стабильности технологического процесса обработки с использованием статистического анализа//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 6 (338). С. 32-40.
14. Козарь И.И., Колодяжный Д.Ю., Радкевич М.М., Цимко Т.А. Математическая модель погрешности при точении труднообрабатываемых сплавов// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. №2(195). С. 194-201.
15. Akbarov X. Improving the Gaussian mechanism for differential privacy: analytical calibration and optimal denoising// E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 383. S. 04065.
16. Patxi Fernandez-Zelaia, Shreyes N. Melkote. Statistical calibration and uncertainty quantification of complex machining computer models// International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2019. Vol. 136. S. 45-61.
17. Богуцкий В.Б., Новоселов Ю.К., Тараховский А.Ю. Математическая модель корректировки настроек технологической системы на основе применения эволюционной популяции конечных автоматов// Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2021. №10. С. 39-43.
18. Кошин А. А., Юсубов Н.Д. Имитационная стохастическая модель полей рассеяния размеров, выполняемых в многоинструментных многосуппортных наладках // Ученые записки АзТУ. 2007. № 1. С. 32-35.
19. Brecher C., Epple A., Neues S., Fey M. Optimal process parameters for parallel turning operations on shared cutting surfaces// International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015. Vol. 95. S. 13–19.
20. Климанов М. М. Повышение точности токарной обработки на основе автоматической системы контроля точности с элементами технического диагностирования. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 2010. 24 с.
21. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Янкин И.Н., Бровкова М.Б. Динамический мониторинг технологического оборудования: монография. Саратов: СГТУ, 2008. 312 с.
22. Khusainov, R.M., Yurasov, S.Y., Ziyatdinov, R.R. et al. Precision of surfaces machined on a lathe with geometric errors// Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. S. 266-269.

Богуцкий Владимир Борисович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Доцент кафедры «Автоматизация и технология машиностроения»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: bogutskivb@yandex.ru

Шрон Леонид Борисович

ГБОУ ВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова», Симферополь.
Доцент кафедры «Электромеханики и сварки»
295015, Республика Крым, г. Симферополь, пер. Учебный, д.8
E-mail: shronlb@mail.ru

BOGUTSKY V.B., SHRON L.B.

CALCULATION OF ADJUSTMENT DIMENSIONS WHEN PROCESSING PARTS ON AUTOMATIC MACHINES AND AUTOMATIC LINES

Abstract. *An analysis of the methods for selecting the tuning size for multi-tool machining on automatic lathes has been performed. A method for calculating the adjustment dimensions is proposed, based on ensuring the rational location of the boundaries of the dispersion field of real production errors included in the tolerance field and guaranteeing the manufacture of the largest possible batch of suitable parts after setting up tools. Based on the analysis of real technological processes, it is shown that the structural components of the considered scheme are common not only for automatic lathes and semi-automatic machines, but can be used in multi-tool machining on CNC machines. This approach is necessary in order to obtain a specified part size that is in close proximity to the required tolerance field*

boundary. It is concluded that in multi-tool processing, the tuning size should be selected from a group of sizes that reflect real power circuits.

Keywords: multi-tool processing, processing accuracy, setting up tools, tool setting up error, adjustment size, tolerance field, closing link.

BIBLIOGRAPHY

1. Avtomatizirovannoe proektirovanie optimalnyh naladok metallorazhushchih stankov/ A.M. Gilman, G.V. Gostev, B.YU. Egorov, YU.V. YAsakov. M.: Mashinostroenie, 1984. 168 s.
2. YUsubov N.D., Abbasova H.M. Sistematika mnogoinstrumentnyh naladok na stankah tokarnoj gruppy // Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty). 2024. T. 26. № 4. S. 92-111.
3. SHishkin V.N., SHEvchenko A.V. Effektivnost avtomaticheskoy razmernoj podnaladki tokarno-revolvnyh stankov//Tekhnologiya i avtomatizatsiya mashinostroeniya. Kiev. 1984. № 33. S. 91-94.
4. Brecher C., Esser M., Witt S. Interaction of manufacturing process and machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2009. Vol. 58(2). S. 588-607.
5. Istomin A.B., Gemba I.N., Lizunov I.V. Mnogoinstrumentalnaya obrabotka v usloviyah kompleksnoj avtomatizatsii tekhnoproessov // Glavnyj mekhanik. 2021. № 7. S. 24-31.
6. Korablev P.A., Kupcov S.G., Pankov G.V. Dvuhsupportnaya tokarnaya obrabotka. Ufa: Bashknigoiadat, 1968. 63 s.
7. Anikeeva O.V., Ivakhnenko A.G., Erenkov O.Yu. Modeling the Influence of Geometric Errors of Turning Machine for Accuracy Machinable Surface.// Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. S. 1127-1132.
8. Ladygina A. V. Osobennosti obrabotki melkorazmernykh detalej na avtomatah prodolnogo tocheniya s chislovyim programmnyim upravleniem // Issledovaniya naukoigrada. 2013. № 1 (3). S. 22-25.
9. K.M. Muditha Dassanayake, Chengri Cui, Masaomi Tsutsumi. Accuracy evaluation method for multitasking turning center / International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems. 2011. Vol. 4(3/4). S. 285-303.
10. Kolcov A.G. Metodika postroeniya matematicheskoy modeli tochnosti obrabotki s uchedom geometricheskikh, kinematicheskikh i dinamicheskikh faktorov/ /OMSKIJ NAUCHNYJ VESTNIK. 2014. № 1(127). S. 96-100.
11. Manikandan H., Bera T.C. A turning simulation environment for geometric error estimation of thin-walled parts// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2022. Vol. 119. S. 789–809.
12. YUsubov N.D. Obobshchenie teorii tochnosti tokarnoj obrabotki. Monogr. Baku: Elm. 2007. 362 s.
13. Boguckij V.B., SHron L.B. Ocenka stabilnosti tekhnologicheskogo processa obrabotki s ispolzovaniem statisticheskogo analiza//Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2019. № 6 (338). S. 32-40.
14. Kozar I.I., Kolodyazhnyj D.YU., Radkevich M.M., Cimko T.A. Matematicheskaya model pogreshnosti pri tochenii trudnoobrabatyvaemykh splavov// Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Cankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. 2014. №2(195). S. 194-201.
15. Akbarov X. Improving the Gaussian mechanism for differential privacy: analytical calibration and optimal denoising// E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 383. S. 04065.
16. Patxi Fernandez-Zelaia, Shreyes N. Melkote. Statistical calibration and uncertainty quantification of complex machining computer models// International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2019. Vol. 136. S. 45-61.
17. Boguckij V.B., Novoselov YU.K., Tarahovskij A.YU. Matematicheskaya model korrekcirovki nastroek tekhnologicheskoy sistemy na osnove primeneniya evolyucionnoy populyatsii konechnykh avtomatov// Transportnoe, gornoe i stroitelnoe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo. 2021. №10. S. 39-43.
18. Koshin A. A., YUsubov N.D. Imitatsionnaya stohasticheskaya model polej rasseyaniya razmerov, vpolnyaemykh v mnogoinstrumentnykh mnogosupportnykh naladkah // Uchenye zapiski AzTU. 2007. № 1. S. 32-35.
19. Brecher C., Eppe A., Neues S., Fey M. Optimal process parameters for parallel turning operations on shared cutting surfaces// International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015. Vol. 95. S. 13-19.
20. Klimanov M.M. Povyshenie tochnosti tokarnoj obrabotki na osnove avtomaticheskoy sistemy kontrolya tochnosti s elementami tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Moskva, 2010. 24 s.
21. Brzhozovskij B.M., Martynov V.V., YAnkin I.N., Brovkova M.B. Dinamicheskij monitoring tekhnologicheskogo oborudovaniya: monografiya. Saratov: SGTU, 2008. 312 s.
22. Khusainov, R.M., Yurasov, S.Y., Ziyatdinov, R.R. et al. Precision of surfaces machined on a lathe with geometric errors// Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. S. 266-269.

Bogutsky Vladimir Borisovich

FSEI of HE «Sevastopol State University»,
Sevastopol
Associate professor of the Department of
«Automation and Mechanical engineering
technology»
299053, Sevastopol, Universitetskaya St., 33
E-mail: bogutskivb@yandex.ru

Shron Leonid Borisovich

SBEIHE RC «Crimean Engineering and Pedagogical
University named after Fevzi Yakubov», Simferopol
Associate professor of the Department of
«Electromechanics and welding»
295015, Republic of Crimea, Simferopol, lane
Uchebny, 8
E-mail: shronlb@mail.ru

КУДРЯВЦЕВ С.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ПРИМЕНЕНИИ НАНОПОКРЫТИЙ ЭПИЛАМА И СОТС НА РАБОЧУЮ ЧАСТЬ РАЗВЕРТКИ

Аннотация. В работе описано моделирование тепловых процессов при совместном применении нанопокровтий эпалама и СОТС на рабочую часть развортки из быстрорежущей стали Р6М5, так как тепловой фактор играет определяющее значение и является основным фактором, влияющим на производительность и стойкость инструмента. В связи с этим исследование теплопередачи и образующегося теплового потока в месте контакта передней и задней поверхностей трибосопряжения контакта инструмента и обрабатываемой заготовки является важной и актуальной научно-технической задачей с целью определения влияния молекулярной пленки эпалама и СОТС на формирование температуры в зоне резания, снижения количества тепла, передаваемого в инструмент и коэффициента трения, что в итоге позволит повысить стойкость сравнительного дорогостоящего и точного инструмента, такого как развортка.

Ключевые слова: развортывание, развортка, низкоскоростные процессы механической обработки, тепловые процессы, теплопередача, температура резания, нанопокровтия эпалама, СОТС, стойкость.

Введение

Температурный фактор является основным критерием, влияющим на стойкость инструмента в части его износа, а также на состояние нанопокровтия эпалама на поверхности режущей части инструмента. Нагрев эпаламированного инструмента выше значений температуры тепловой деструкции нанопокровтия приведет к его разрушению, и соответственно, к снижению периода стойкости и быстрому изнашиванию инструмента.

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является моделирование процессов теплообмена при процессе развортывания эпаламированным инструментом в совместном применении со смазочно-охлаждающими технологическими средствами (СОТС) с целью определения влияния нанопокровтия эпалама и молекулярной пленки СОТС на количество теплоты, переходящее в инструмент, а также на температуру резания.

Основная часть

В зоне резания в теплообмене участвуют три объекта: заготовка (изделие), инструмент и стружка. Тепло, генерируемое источниками 1, 2, 3 распределяется между этими объектами.

Кроме того, часть выделяющегося тепла при установившемся тепловом процессе в зоне резания сохраняет равновесие между генерируемым (приходящим) и потребляемым (уходящим) теплом – тепловой баланс [1].

По признаку выделения образующегося тепла различают три тепловых источника в зоне резания (рисунок 1) [1]:

- 1) в зоне основной деформации Q_0 ;
- 2) в зоне трения на передней поверхности Q_n ;
- 3) в зоне трения на задней поверхности Q_z .

Поскольку напряженно-деформированное состояние в различных точках областей 1, 2, 3 неодинаково, то и совершаемая механическая работа, а значит, и количество выделяющегося тепла в этих точках тоже будет неодинаковым. Поэтому в соответствии с вышеприведенной классификацией все три тепловых источника в зоне резания – трехмерные неоднородные источники [1].

Количество теплоты, выделяющейся при резании, и её распределение помимо стойкости влияет также на качество обработки, температурную деформацию обрабатываемой заготовки, режущего инструмента, узлов станка и приспособлений [2].

Рассмотрим тепловую модель при процессе развортывания (рисунок 1).

При резании металлов соблюдается тепловой баланс:

$$Q_{\text{общ}} = Q_d + Q_n = q_c + q_z + q_u + q_{oc} \quad (1)$$

где $Q_{\text{общ}}$ – общее количество тепла; Q_n – количество теплоты, выделяющееся при трении стружки о переднюю и заднюю поверхность инструмента; q_c – количество тепла, отводимого стружкой, Дж; q_z – количество тепла отводимого заготовкой; q_u – количество тепла

отводимого инструментом, Дж; q_{oc} – количество теплоты, переходящее в окружающую среду, в том числе в процессе конвективного теплообмена при применении СОТС, Дж.

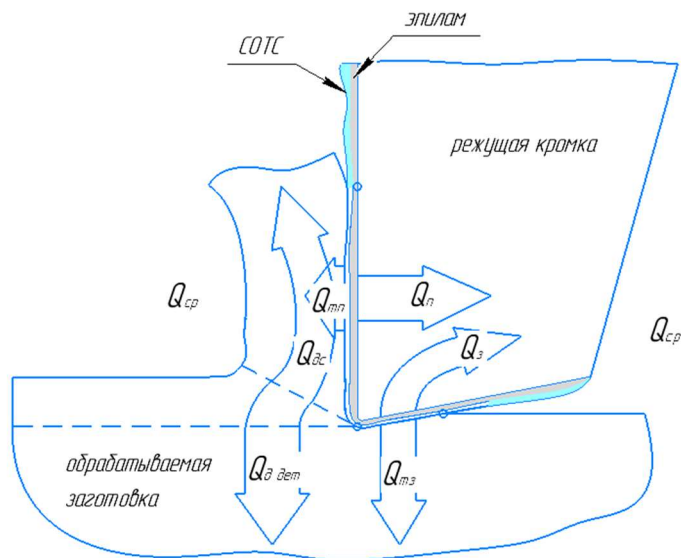


Рисунок 1 – Схема распределения потоков теплоты, образующихся от источников тепла при процессе резания

Распространение тепла внутри каждого из твердых тел, участвующих в теплообмене (заготовка, инструмент и стружка), а также переход тепла от одного из них к другому через площадки непосредственного контакта осуществляются за счет передачи тепла от более нагретых участков к менее нагретым [1].

Например, теплота трения Q_{II} по передней Q_{II} и задней поверхности Q_3 будет распределяться в инструмент, что в конечном итоге будет влиять на его стойкость, так как повышенная термонагруженность инструмента влияет на его ускоренный износ и затупление.

В связи с этим научной задачей является моделирование влияния многослойного покрытия (эпилам+СОТС) на снижение теплоты Q_{II} и температуры θ_{II} передающейся в инструмент, что позволит прогнозировать влияние многослойного покрытия на температуру на поверхности инструмента для прогнозирования периода стойкости развертки.

Для моделирования теплопереноса от стружки и детали к инструменту молекулярную пленку СОТС можно принять за жидкостную прослойку между двумя твердыми телами – заготовкой и наномолекулярной пленкой эпилама. Тогда перенос теплоты через 2 твердые стенки (заготовка и пленка эпилама) и жидкостную прослойку между ними (пленка СОТС) можно рассматривать как перенос теплоты через сложную трехслойную стенку [3].

По мнению Михеева М. А. для облегчения расчета и упрощения обработки опытных данных сложный процесс передачи теплоты через жидкостную прослойку принято рассматривать как элементарный процесс передачи теплоты путем теплопроводности, вводя при этом некоторый эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эк}$ [3].

Но, если требуется определить перенос теплоты через молекулярную пленку СОТС (прослойку), которая является частью сложной стенки (многослойного покрытия), то расчет теплопередачи производится как для многослойной стенки (деталь-СОТС-эпилам-инструмент) с определением эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эфф}$ [3].

Водосмешиваемая и масляная СОТС относятся к капельным жидкостям, следовательно эквивалентный коэффициент теплопроводности равен [3]:

$$\lambda_{эфф} = \varepsilon_k \lambda \quad (2)$$

где ε_k – коэффициент конвекции;

λ – коэффициент теплопроводности СОТС.

Учитывая, что циркуляция жидкости обусловлена разностью плотностей нагретых и холодных частиц и определяется произведением $GrPr$, то ε_k должно быть функцией того же аргумента [3]:

$$\varepsilon_k = f(Gr_{ж} Pr_{ж}) \quad (3)$$

Молекулярная пленка СОТС характеризуется скорее малыми значениями аргумента $(Gr_{ж} Pr_{ж}) < 1000$, тогда значение функции $\varepsilon_k = 1$. Это означает, что при малых значениях $Gr_{ж} Pr_{ж}$ перенос теплоты от горячей стенки к холодной через прослойки обуславливается только теплопроводностью жидкости [3].

В связи с этим для молекулярной пленки СОТС эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эфф}$ равняется коэффициенту теплопроводности СОТС λ :

$$\lambda = \varepsilon_k \lambda \quad (4)$$

Тогда общий вид процесс теплопроводности описывается законом Фурье:

$$\partial W = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С.

Знак «минус» показывает, что вектор распространения теплоты противоположен вектору градиента температур [4].

Для определения теплопроводности многослойного покрытия воспользуемся законом Фурье для многослойной стенки:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_i}, \frac{Bm}{m^2} \cdot ^\circ C \quad (6)$$

где t_1 – температура на поверхности 1-го слоя, °С; t_{n+1} – температура на поверхности n-го слоя, °С; i – число слоев (от 1 до n); R_i – термическое сопротивление i-го слоя пластины, м²·°С/Вт

Нанесенную пленку нанопокртия эпилама можем принять за твердое тело определенной толщины и теплопроводности, которое позволяет отводить некоторое количество тепла от инструмента.

Модель теплопередачи при применении нанопокртий и СОТС между инструментом и обрабатываемой заготовкой представлена на рисунке 2.

Плотности тепловых потоков через слой СОТС и эпиламов:

$$q_{comc} = \frac{\lambda_1}{\delta_1} \cdot (t_1 - t_2), \quad (7)$$

$$q_{un} = \frac{\lambda_2}{\delta_2} \cdot (t_2 - t_3), \quad (8)$$

где t_2 – температура в точке контакта пленки СОТС и эпилама, °С;

t_3 – температура на поверхности инструмента, °С;

δ_1 – толщина слоя СОТС;

λ_1 – коэффициент теплопроводности СОТС;

δ_2 – толщина слоя нанопокртия эпилама;

λ_2 – коэффициент теплопроводности нанопокртия эпилама.

Определение значение t_2 возможно за счет коэффициента, учитывающего влияние СОТС на температуру резания k_{comc} , следовательно запишем:

$$t_2 = \frac{t_1}{k_{comc}}, \quad (9)$$

k_{comc} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние СОТС на температуру резания.

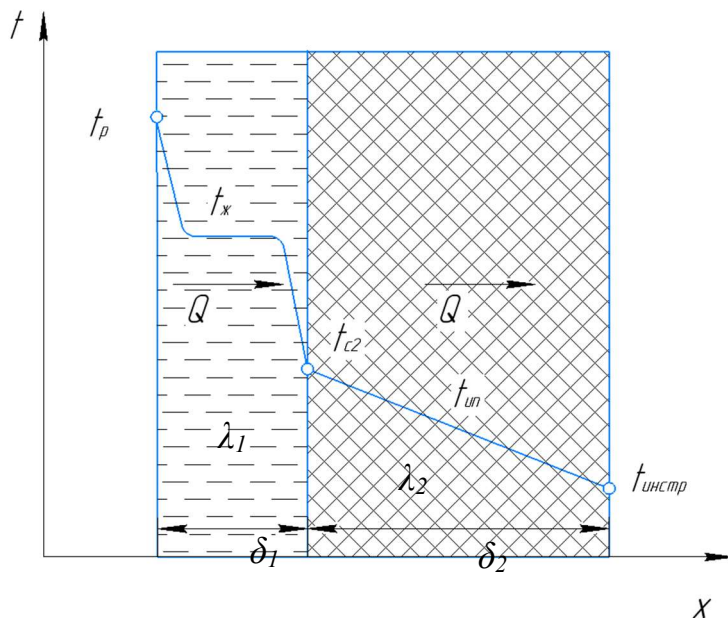


Рисунок 2 – Модель теплопередачи многослойного покрытия (эпилам+СОТС)

Решая эти уравнения, относительно разности температур и складывая, получаем:

$$q = \frac{(t_1 - t_3)}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1}\right)} = \frac{(t_1 - t_3)}{R_0}, \quad (10)$$

где R_0 – общее термическое сопротивление многослойного покрытия (эпилам+СОТС).

$$R_0 = \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\lambda_2}{\delta_2}\right), \quad (11)$$

Определение толщины пленки СОТС, которая характеризует проникающую способность СОТС возможно на основе формулы Ньютона для определения вязкостного трения:

$$\delta_1 = \eta \frac{S \cdot v_c}{F}, \quad (12)$$

где η – абсолютная вязкость масла, Нс/м²; S – площадь соприкосновения трущихся тел, м²; v_c – скорость перемещения трущихся поверхностей (схода стружки), м/с; F – сила жидкостного трения, Н.

При этом должна соблюдаться закономерность [5]:

$$\delta_{\min} \geq 1,5 \cdot (h_1 + h_2), \quad (13)$$

где h_1 и h_2 – максимальные высоты выступов на поверхностях трения, обеспечивающие устойчивое и надежное жидкостное трение.

Проникающая способность СОЖ зависит от ее физических свойств (вязкость, плотность, химическая активность и т. д.) и от способа подвода ее в зону резания (рисунок 3) [5].

Проникновение СОЖ в клиновидный зазор между стружкой и поверхностью режущего инструмента происходит из-за капиллярного эффекта. По некоторым данным при низких и средних скоростях резания контакт стружки с резцом имеет точечный характер 0,5...1,0 мкм,

что обеспечивает эффективное и постоянное поступление СОЖ и ее паров в отличие от высокоскоростного резания, где контакт стружки с резцом имеет сплошной характер [5].

Тогда разницу температур, обеспечивающуюся за счет теплопроводности нанопокртия эпилама запишем в виде:

$$(t_2 - t_3) = q \frac{\delta_2}{\lambda_2}, \quad (14)$$

Эпиламы Эфрен-2 (Э-2) и 6СФК-180-05 (СК), представляют собой соответственно 0,05 и 0,5 % – растворы перфторполиэфиркислоты 6МФК-180 общего вида (i/COOH) в хладоне 113 толщиной до 30-40 нм [6].

Толщина эпилама марки Эфрен-2 также может составлять от 5 до 20 нм, эпилама марки 6СФК-180-05 от 4 до 10 нм [7,8], марки Эфрен-К (композиционное покрытие) – до 100 нм [9].

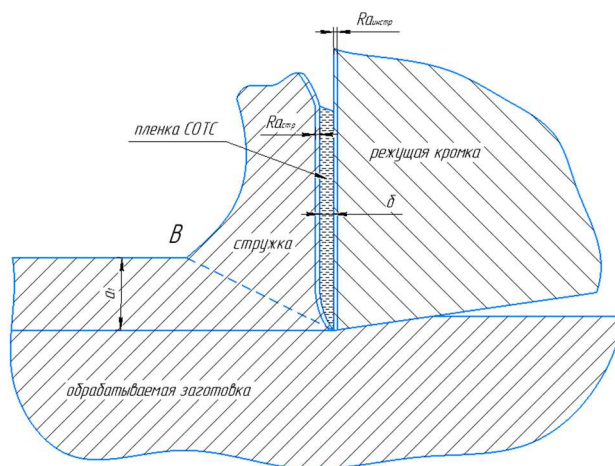


Рисунок 3 – Схема действия СОЖ при резании

Нанопокртия эпилама обладают относительно малой теплопроводностью в отличие от жидкостной СОТС, и следовательно, при прямом охлаждении они менее эффективны по сравнению с охлаждением СОТС. Термостабильная пленка нанопокртия эпилама позволяет несколько снизить количество тепла, передающееся в инструмент из зоны трения о переднюю и заднюю поверхности.

Теплопроводность смазок на основе перфторполиэфиров по данным компании Solvay Solexis имеет значение около $\lambda = 0,07 \frac{Вт}{м \cdot К}$, [6,10], теплопроводность перфторполиэфира Pfre JHT-270 составляет $\lambda = 0,065 \frac{Вт}{м \cdot К}$ [11].

По результатам исследования на основе теплофизической задачи на графике (рисунок 4) представлена зависимость толщины покрытия от коэффициента снижения температуры при применении нанопокртий, в том числе с СОТС.

При увеличении толщины нанопокртия эпилама тепловая стойкость покрытия увеличивается как бы еще больше «защищая» инструмент, что должно положительно сказываться на его стойкости.

Тогда формула для определения коэффициента k_1 , учитывающего влияние нанопокртий эпилама и СОТС на температуру резания, передающуюся в инструмент:

$$k_1 = \frac{t_1}{t_3} = \frac{\theta_p}{\theta_{инсотс}}, \quad (15)$$

где θ_p – температура в зоне резания.

Определение температуры на поверхности инструмента через многослойное покрытие $\theta_{инсотс}$, значение температуры в точке контакта СОТС и эпилама находится следующим образом:

$$\theta_{uncomc} = t_2 - q \frac{\lambda_2}{\delta_2}, \quad (16)$$

Плотность теплового потока определяется следующим образом:

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (\theta_p - \theta_{comc}), \quad (17)$$

По результатам исследования на основе теплофизической задачи на графике (рисунок 4) представлена зависимость толщины покрытия от коэффициента снижения температуры при применении нанопокровтий (2), в том числе с СОТС (1).

При увеличении толщины нанопокровтия эпилама тепловая стойкость покрытия увеличивается как бы еще больше «защищая» инструмент, что должно положительно сказываться на его стойкости.

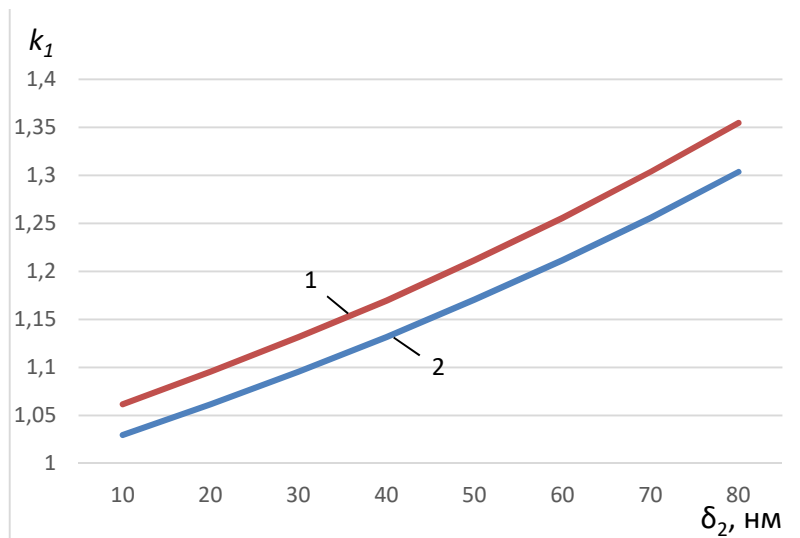


Рисунок 4 – Влияние толщины нанопокровтия эпилама δ_2 на коэффициент снижения температуры k_1 при: 1 – совместном применении с масляной СОТС; 2 – при применении без СОТС

В работе Звягиной Е.А. [12] установлено, что при увеличении скорости резания V с 7,5 до 10,5 м/мин нанопокровтия эпилама показывают меньший эффект снижения температуры в зоне резания при процессе сверления, что скорее всего связано с повышением температуры резания, уменьшением толщины пленки СОТС и трибопереносом молекул эпилама и также установлено, что при увеличении глубины обработки отверстия L с 10 до 50 мм нанопокровтия эпилама снижают температуру резания более эффективно, чем при обработке отверстий глубиной $L=10$ мм, что скорее всего объясняется стабилизацией процесса резания при большей глубине резания.

В связи с этим сделаем поправку на глубину обработки отверстия и следовательно, формула для определения коэффициента, отражающего влияние многослойного покрытия (эпилам+СОТС) на температуру в зоне резания с поправкой на глубину резания L будет выглядеть следующим образом:

$$k_{uncomc} = \frac{C_v \cdot k_1}{v^x \cdot S^y \cdot t^p \cdot L^z \cdot \mu^{0,45}}, \quad (18)$$

где L – глубина обработки отверстия, мм.

На основании сопоставления результатов экспериментов эпиламированной и неэпиламированной развертки из быстрорежущей стали Р6М5 получено значение коэффициента повышения периода стойкости K_1 за счет применения нанопокровтий эпилама Эфрен-К ТУ 6-02-2-929-87 и СОЖ ГОСТ Р 50558-93 с учетом влияния режимов обработки:

$$K_1 = \frac{0,025}{V^{0,21} S_z^{1,03} t^{0,38}}, \quad (19)$$

Проведем сравнительный анализ математической модели на основе экспериментальных данных, представленных в работе Звягиной Е. А. [12] при сверлении инструментом из быстрорежущей стали Р6М5 при скоростях резания $V=7,5...10,5$ м/мин, подаче $S=0,14$ мм/об и глубине резания $t=3,35$ мм (1/2 от диаметра сверла $d=6,7$ мм) и экспериментальными данными при применении нанопокровтий эпилама и СОТС при процессе обработкой отверстий разверткой из быстрорежущей стали Р6М5 $V=3...7$ м/мин, подаче $S=0,5...1,2$ мм/об и глубине резания $t=0,045...0,06$ мм без учета коэффициента k_1 , учитывающего влияние нанопокровтий эпилама и СОТС на температуру резания, передающуюся в инструмент.

Таблица 1 – Значение коэффициентов регрессии математической модели при обработке стали 45

Марка эпилама	Марка СОТС	C_v	x	y	p	z
Эфрен-2	MP-7	0,0250	0,45	0,90	0,19	-0,25
6СФК-180-05	MP-7	0,0345	0,27	0,90	0,19	-0,25
Эфрен-К	ГОСТ Р 50558-93	0,025	0,21	1,03	0,38	-

Заключение

Формируемая пленка нанопокровтий эпилама работает совместно с молекулярной пленкой СОТС на поверхностях режущей части инструмента, позволяя несколько перераспределять тепловые потоки от инструмента в стружку или деталь, но основным качеством нанопокровтий эпилама является снижение коэффициента трения на задней поверхности и частично на передней поверхности режущей кромки инструмента в силу образующих максимальных касательных напряжений при обработке конструкционных сталей. Теоретическая модель определения влияния совместного применения нанопокровтий эпилама и СОТС позволяет прогнозировать снижение температуры в зоне резания и на поверхности инструмента и, следовательно, стойкость и производительность обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сысоев, В. И. Тепловые процессы в зоне резания Резание металлов станки и инструмент / В. И. Сысоев. – М.: МАШГИЗ, 1960. – С. 480.
2. Теплообразование при резании металла: stanotex.ru: официальный сайт компании Stanotex, 2025 URL: <https://www.stanotex.ru/teploobrazovanie-pri-rezanii/> (дата обращения 04.07.2025)
3. Михеев, М. А. Основы теплопередачи: учебное пособие / М. А. Михеев – Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
4. Теплотехника и техническая термодинамика / М. В. Меркулов, В. А. Косьянов, А. Ю. Башкуров, С. В. Головин. – Рязань : ООО «Полиграфия», 2017. – 166 с. – ISBN 978-5-905051-19-7. – EDN YNFUVH.
5. Исследование образования смазывающей пленки смазочно-охлаждающей жидкости при обработке жаропрочного и титанового сплавов / А. Ю. Попов, Д. С. Реченко, А. Г. Кисель [и др.] // Омский научный вестник. – 2015. – № 1(137). – С. 41-43. – EDN UCDJWD.
6. Гриценко, П. А. Повышение надежности и энергосбережения за счет применения эпиламинирования / П. А. Гриценко, П. А. Козлович // Инженер-механик. – 2009. – № 2. – С. 2-7.
7. MOSLABO.RU : сайт. – URL: <https://www.moslabo.ru/production/himreaktivy/tehnaslasmaszki/smazochnaya-kompozitsiya-6sfk-180-05-6sfk-180-20/> (дата обращения: 16.11.2025)
8. INHM.RU : сайт. – URL: <https://inhm.ru/product/smazochnaya-kompozitsiya-6sfk-180-05> (дата обращения: 16.11.2025)
9. Гузеев, В. И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением : справочник / В. И. Гузеев, В. А. Батуев, И. В. Сурков; под ред. В. И. Гузеева. – Москва : Машиностроение, 2005. – 364 с.
10. Волняков, К. А. Влияние смазочных материалов на теплопроводность в зоне контакта поверхностей / К. А. Волняков // Экстремальная робототехника. – 2018. – № 1(29). – С. 96-106. – EDN YNCULB.
11. FLUORINES-CHEMICALS.COM : сайт. – URL: <https://ru.fluorines-chemicals.com/fluoropolymer/cooling-fluid-pfpe-perfluoropolyether-jht-270.html> (дата обращения: 14.10.2025)
12. Звягина, Е. А. Технологическое обеспечение эффективности обработки эпиламинированными быстрорежущими сверлами : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Звягина Елена Александровна ; Орловский государственный технический университет. – Орел, 2008. – 16 с. – Библиогр.: с 9 по 12. – Место защиты : Орловский государственный технический университет. – Текст : непосредственный.

Кудрявцев Сергей Васильевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл соискатель учёной степени кандидата технических наук
302030, г. Орёл, ул. Московская д. 34
Тел.: +7 (920) 818-10-16,
E-mail: slalder123@yandex.ru

KUDRYAVTSEV S.V.

MODELING OF THERMAL PROCESSES IN THE COUPLE APPLICATION OF EPILAM NANOPROTECTIVE COATINGS AND CUTTING OIL ON THE WORKING PART OF THE REAMER

Abstract. *The paper describes the modeling of thermal processes in the joint application of epilam nanoprotective coatings and cutting oil on the working part of the reamer made of high-speed steel R6M5, as the thermal factor plays a decisive role and is the main factor affecting the productivity and durability of the tool. Consequently, the study of heat transfer and the resulting heat flow at the contact point of the front and rear surfaces of the tribosystem of the tool and the workpiece is an important and relevant scientific and technical task in order to determine the effect of the molecular film of epilam and cutting fluid on the formation of temperature in the cutting zone, to reduce the amount of heat transferred to the tool and the coefficient of friction, which will ultimately increase the durability of a relatively expensive and precise tool such as a reamer.*

Keywords: *deployment, scanning, low-speed machining processes, thermal processes, heat transfer, cutting temperature, epilam nano-coatings, cutting fluid, and durability.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sysoev, V. I. Thermal Processes in the Cutting Zone Cutting Metals Machines and Tools / V. I. Sysoev. – Moscow: MASHGIZ, 1960. – P. 480.
2. Heat Generation during Metal Cutting: stanotex.ru: official website of the Stanotex company, 2025 URL: <https://www.stanotex.ru/teploobrazovanie-pri-rezanii/> (accessed on 04.07.2025)
3. Mikheev, M. A. Fundamentals of Heat Transfer: Textbook / M. A. Mikheev – 2nd Edition. – Moscow: Energiya, 1977. – 344 p.
4. Thermal Engineering and Technical Thermodynamics / M. V. Merkulov, V. A. Kosyanov, A. Yu. Bashkurov, and S. V. Golovin. – Ryazan: Poligrafiya LLC, 2017. – 166 p. – ISBN 978-5-905051-19-7. – EDN YNFUVH.
5. Popov A. Yu., Rechenko D. S., Kisel A. G. Investigation of the formation of a lubricating film of a coolant during the processing of heat-resistant and titanium alloys [et al.] // Omsk Scientific Bulletin. – 2015. – № 1(137). – Pp. 41-43. – EDN UCDJWD.
6. Gritsenok, P. A. Increase in reliability and energy saving due to the use of epilamirovaniya / P. A. Gritsenok, P. A. Kozlovich // Mechanical Engineer. – 2009. – No. 2. – Pp. 2-7.
7. MOSLABO.RU : website. – URL: <https://www.moslabo.ru/production/himreaktivy/tehnaslaslamazki/smazochnaya-kompozitsiya-6sfk-180-05-6sfk-180-20/> (accessed: 16.11.2025)
8. INHM.RU : website. – URL: <https://inhm.ru/product/smazochnaya-kompozitsiya-6sfk-180-05> (accessed: 16.11.2025)
9. Guzeev, V. I. Cutting Modes for Lathes and Drilling and Milling-Boring Machines with Numerical Program Control: Handbook / V. I. Guzeev, V. A. Batuev, I. V. Surkov; edited by V. I. Guzeev. – Moscow : Mechanical Engineering, 2005. – 364 p.
10. Volnyakov, K. A. Influence of Lubricants on Thermal Conductivity in the Contact Zone of Surfaces / K. A. Volnyakov // Extreme Robotics. – 2018. – No. 1(29). – Pp. 96-106. – EDN YNCULB.
11. FLUORINES-CHEMICALS.COM : website. – URL: <https://ru.fluorines-chemicals.com/fluoropolymer/cooling-fluid-pfpe-perfluoropolyether-jht-270.html> (accessed on: 14.10.2025)
12. Zvyagina, E. A. Technological support of the efficiency of processing with epilamated high-speed drills : specialty 05.02.08 «Technology of mechanical engineering» : abstract of the thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences / Zvyagina Elena Aleksandrovna ; Orel State Technical University. – Orel, 2008. – 16 p. – Bibliogr.: p. 9-12. – Place of defense : Orel State Technical University. – Text : direct.

Kudryavtsev Sergey Vasilyevich

Orel State University,
Candidate of scientific degree of Candidate of Technical Sciences
302030, Orel, Moskovskaya str., 34
Ph.: +7 (920) 818-10-16,
E-mail: slalder123@yandex.ru

ОБРАЗЦОВ А.Е., УТЕНКОВ В.М., КУЗНЕЦОВ П.М.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ ИНСТРУМЕНТА НА КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования ультразвукового вибрационного резания оптического стекла с использованием высокоточного фрезерного станка с ЧПУ ПРИЗМА-500АФ3. Обработка выполнялась в двух режимах: традиционное резание и ультразвуковая обработка при частоте колебаний 22,4 кГц на трех глубинах резания 10 мкм, 20 мкм и 30 мкм. Проведен анализ структуры поверхности канавок относительно механизма удаления материала (хрупкое разрушение, переходной режим, обработка в режиме квазипластичности). Показано, что при использовании ультразвуковых колебаний механизм удаления преобразуется от преобладающего хрупкого разрушения к квазипластичному, при этом с ростом глубины резания расширяется область переходного режима, а дефекты остаются в поверхностном слое даже при глубине 30 мкм. В отличие от традиционного резания, при котором наблюдаются выраженные микротрещины, сколы и отказ инструмента при максимальной глубине резания, ультразвуковая обработка обеспечивает снижение интенсивности образования микротрещин, повышает период стойкости режущего инструмента и улучшает качество обработанной поверхности. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения ультразвукового вибрационного резания для повышения точности и качества обработки поверхности оптического стекла.

Ключевые слова: управление качеством обработки, ультразвуковое резание, ультразвуковые колебания инструмента, обработка хрупких материалов, осциллирующие движения инструмента, лезвийная обработка хрупкого материала, квазипластичное резание.

Введение

Хрупкие материалы (оптическое стекло, кремний, германий) используются в прецизионном машиностроении и полупроводниковой промышленности, требуя высокого качества поверхности, точности и целостности поверхностного слоя.

Абразивные процессы, такие как шлифовка, притирка и полировка, традиционно используются для отделочной обработки хрупких материалов, однако им присущи существенные ограничения: низкая скорость съема материала, высокая себестоимость и риск получения дефектов в поверхностном слое [1].

Абразивная обработка сверх хрупких материалов приводит к появлению царапин, сколов и прочим дефектам поверхности. Завышение режимов шлифования, выкрашивание абразивных зёрен шлифовального круга приводят к отклонению от обрабатываемого профиля поверхности, а качество удаления материала становится не контролируемым. В качестве альтернативы применяют химико-механическую полировку для удаления поврежденного поверхностного слоя, вызванный абразивными частицами, что в итоге увеличивает производственные расходы и не всегда позволяет получить желаемый результат [2].

Для преодоления указанных ограничений со второй половины прошлого века исследуется и внедряется технология обработки в пластичном режиме (квазипластичное резание). Её фундаментальный механизм основан на контролируемом удалении материала за счёт пластического течения, а не хрупкого разрушения, что обеспечивает поверхность без микротрещин и других дефектов. В результате данная технология исключает необходимость последующей полировки, либо существенно сокращает общее время финишной обработки. Однако данный метод обработки не является высокопроизводительным поскольку глубина резания составляет менее 10 мкм [3, 4, 5].

Механизм квазипластичного резания

Пластичность материала определяется как способность подвергаться необратимому изменению размеров, формы без разрушения. Все материалы обладают определенной степенью пластичности.

Пластичность хрупких материалов, под воздействием индентора, может быть объяснена механизмом фазового превращения, при котором характерная фаза хрупкого твердого тела переходит в пластичную. Процесс удаления материала протекает в четыре этапа: (1) упругая деформация материала под индентором, создающая локальную зону высокого гидростатического давления; (2) образование радиальных и срединных трещин на границе упругопластической области при увеличении нагрузки; (3) возникновение боковых трещин; (4) при достаточно высокой нагрузке эти трещины вызывают критическое нарушение структуры и образование сколов. Остаточные напряжения являются основным фактором,

провоцирующим боковое растрескивание и, в конечном итоге, разрушению материала. При обработке кремния алмазным инструментом следует избегать такого механизма удаления материала для исключения хрупкого разрушения и образования микротрещин [6].

Целостность подповерхностного слоя является важным параметром, определяющий результат обработки хрупких материалов. При механической обработке монокристаллического кремния в подповерхностной области возникает аморфизация кристаллической решетки, поликристаллизация, накопление дислокаций и формирование микротрещин, которые в совокупности приводят к хрупкому разрушению. Глубина повреждения подповерхностного слоя кремниевых пластин, при сверхточном шлифовании, составляло примерно 1 – 3 мкм, а при высокоточном достигало 6 мкм. Данный поврежденный слой удалялся химико-механической полировкой, что уменьшало производительность и повышало экономические затраты [7, 8].

Экспериментальные исследования поверхности хрупких материалов, полученные в режиме пластичного удаления, показали, что шероховатость поверхности кремния уменьшилась по сравнению с абразивной обработкой [9]. Шероховатость после обработки стала менее 10 нм при точении кремниевых пластин [10]. В работе [11] достигли шероховатость менее 20 нм при алмазном точении оптических материалов.

Авторы [12] получили значение шероховатости $Ra = 14,5$ нм при микроточении оптического стекла. В работе [13] показано, что качество обработанной поверхности оптического стекла определяется характером микротрещин, остаточными напряжениями в подповерхностном слое.

Сканирование электронной микроскопией обработанных поверхностей, полученных при высокоскоростном микрофрезеровании карбида вольфрама, показало, что пластичный режим обработки может быть достигнут при сверхмалой глубине резания (рисунок 1) [14].

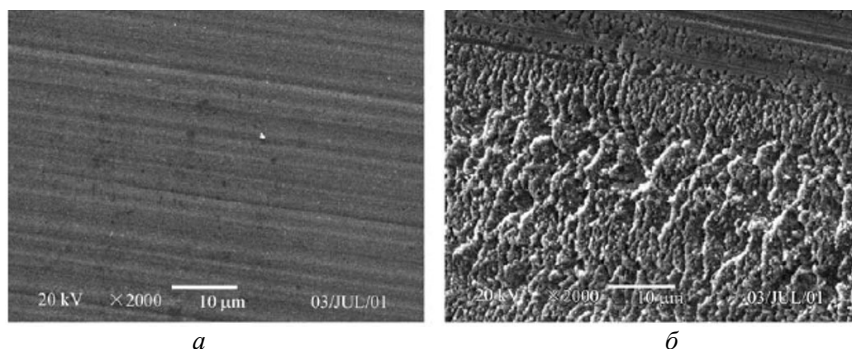


*Рисунок 1 – Фотографии обработанной поверхности карбида вольфрама, полученные на сканирующем электронном микроскопе:
а – глубина резания 644 нм; б – глубина резания 1164 нм*

При резании, где глубина превышает пороговое значение, наблюдается образование микротрещин, сколов на обработанной поверхности (рисунок 2). Фотографии, полученные с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ), демонстрируют, что пластичный режим обработки кремния может быть получен только при сверхмалой глубине резания. Для глубины резания 348 нм проявляется трещинообразование (рисунок 2б, 2г). При глубине 65 нм такого не наблюдается (рисунок 2а, 2в) [1, 6].

Ультразвуковая обработка

Обработка с применением колебаний – это процесс обработки, при котором в традиционный процесс резания вводится внешняя энергия и инструмент или заготовка приводится в колебательное движение. Для улучшения процесса обработки параметры колебаний подбираются таким образом, чтобы выполнялось прерывистое резание, что снижает силы резания, улучшает условие удаления стружки и происходит ее дополнительное измельчение [15, 16, 17], увеличивается срок службы инструмента [18], улучшается качество поверхности и точности формообразования, а также снижается образование заусенцев в процессе резания [19, 20, 21]. Что касается труднообрабатываемых материалов, таких как титановый сплав, керамика и оптическое стекло, то также обнаружено, что при резании в пластичном режиме допустимая глубина увеличивается, что повышает производительность при изготовлении деталей сложной формы [22].

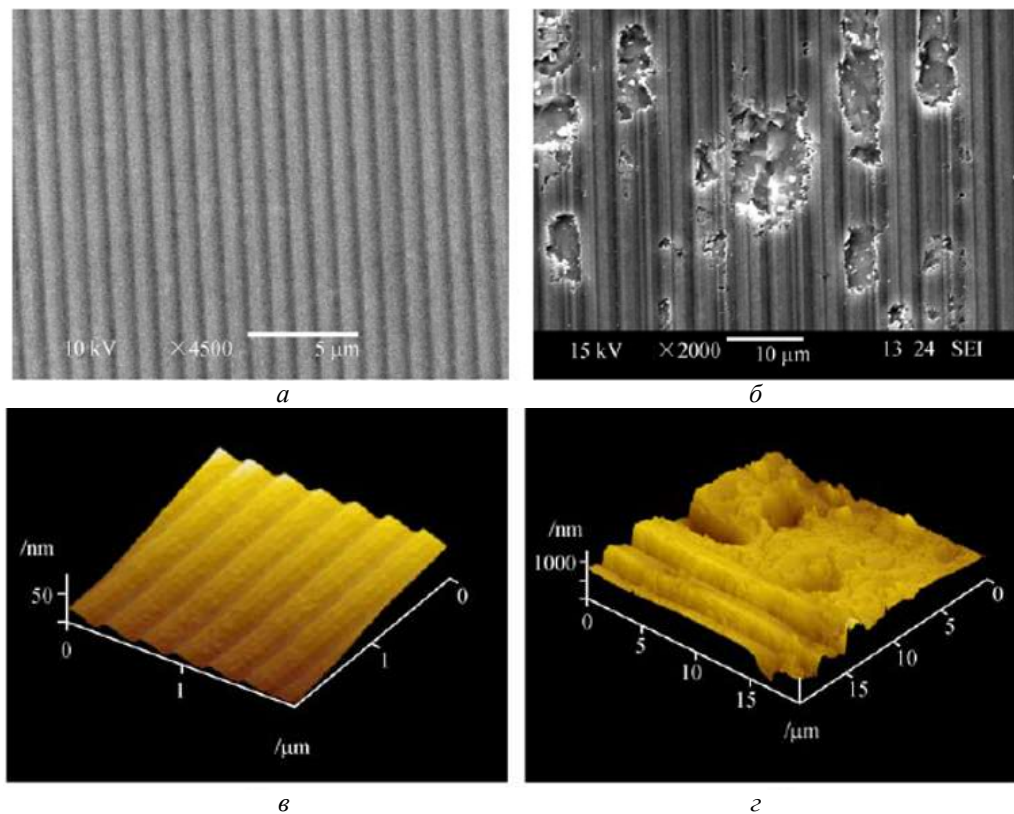


Рисунок 2 – Фотографии поверхности на СЭМ и АСМ после обработки кремния:
а – глубина 65 нм (СЭМ); б – глубина 348 нм (СЭМ); в – глубина 65 нм (АСМ); г – глубина 348 нм (АСМ)

Ученые [23] пришли к выводу, что вибрационная обработка существенно снижает силу резания, улучшая обрабатываемость материалов. Что касается стабильности резания, исследования показывают, что технология виброрезания эффективно подавляет паразитные вибрационные возмущения даже при больших радиусах инструмента [24].

Высокочастотные микроперемещения между алмазным инструментом и обрабатываемой деталью изменяет характер трения на поверхности резания, снижает удельную силу резания и улучшает распределение напряжения сдвига [25, 26, 27]. В результате улучшается качество поверхности детали и уменьшается ее шероховатость.

Результаты исследований, представленные в [28], свидетельствуют о положительном воздействии ультразвуковых колебаний на качественные показатели процесса сверления. Экспериментальные наблюдения указывают на то, что введение аксиальных высокочастотных колебаний приводит к значительному улучшению поверхности и снижению скорости износа режущего инструмента.

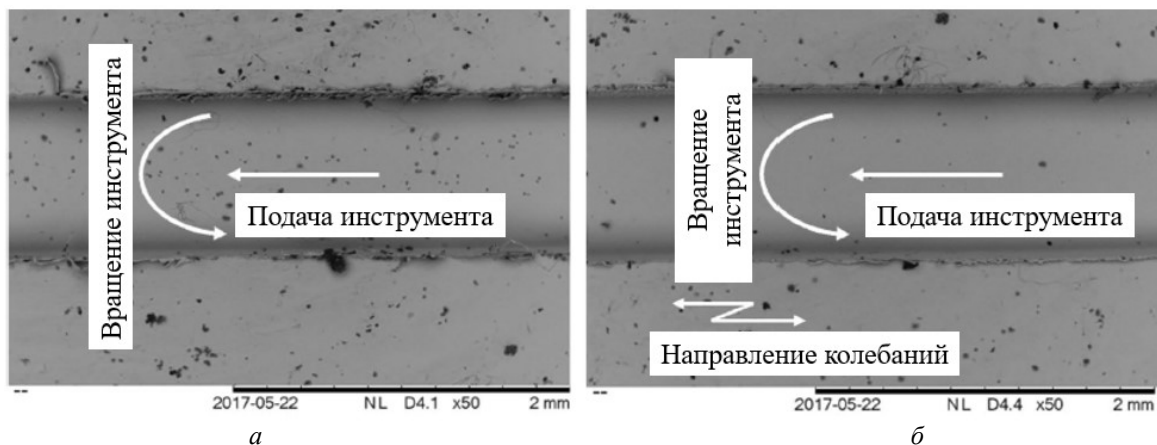


Рисунок 3 – Поверхность обработанного образца из магниевого сплава:
а – традиционном микрофрезеровании; б – с применением колебаний

Сравнивая традиционное микрофрезерование и с применением колебаний на образцах из магниевого сплава, при одинаковых режимах резания, отмечены существенные различия. В первом случае (традиционная обработка) образовывались заусенцы, сколы и микротрещины. Во втором случае получалась поверхность с меньшей микронеровностью (рисунок 3).

Ультразвуковая обработка – частный случай вибрационной обработки, когда на инструмент или заготовку сообщаются колебательные движения в ультразвуковом диапазоне, тем самым меняется физика процесса резания. Для создания колебательных движений используется преобразователь (магнитострикционный/пьезоэлектрический) для преобразования электрической энергии в энергию механических колебаний [29]. Ультразвуковая обработка улучшает проникновение охлаждающей жидкости на поверхность раздела инструмент-заготовка, уменьшая трение в зоне резания и снижая температуру, что уменьшает подповерхностные повреждения и износ инструмента [30].

В работе [31] обнаружили, что применение ультразвуковых снижает силу резания и температуру, повышает стойкость инструмента и качество обрабатываемой поверхности. Авторы [32] исследовали классическое 1D линейное ультразвуковое устройство. Эксперимент по обработке канавок в стекле для определения влияния колебаний на допустимую глубину резания показали увеличение допустимой глубины до 1,5 мкм.

В исследовании [33] обрабатывали сталь с применением колебаний в ультразвуковом диапазоне. Получили улучшение качества обработанной поверхности, периода стойкости инструмента по сравнению с традиционной обработкой. Авторы [34], применив ультразвуковые колебания для обработки титановых сплавов обнаружили улучшения качества поверхности и условий стружкообразования. В работе [27] исследовали обрабатываемость никелевых сплавов ультразвуковой обработкой, отмечено снижение шероховатости поверхности с 60 нм до 4,815 нм и уменьшение подповерхностных повреждений с 2,27 мкм до 0,190 мкм.

В работе [35] проведено экспериментальное исследование процесса механической обработки при применении и отсутствии ультразвукового воздействия. Ультразвуковые колебания имели амплитуду 1 мкм и частоту 103 кГц. В качестве режущего инструмента использовался резец с радиусом при вершине 1 мм, углами передней и задней поверхностей 0° и 15° соответственно. Образцы выбирались из высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi толщиной 10 мм и предварительно подвергались электроэрозионной обработке с целью обеспечения требуемой параллельности поверхностей. Все экспериментальные исследования проводились в режиме сухой обработки.

Трёхмерная морфология и шероховатость поверхности измерялись интерферометром белого света, микроморфология – атомно-силовым микроскопом, а визуальное наблюдение за повреждениями поверхности, стружкообразованием и износом инструмента выполнялось с помощью сканирующего электронного микроскопа.

При обработке методом традиционного резания на поверхности материала формируются разные повреждения, углубления, приводящие к хрупкому разрушению.

Общий вид поверхности образца после традиционного резания (рисунок 4а) с выделенными дефектными зонами А, В и Д. Увеличенная область Б демонстрирует наличие дефектов поверхности в виде углублений (ямок), указывающих на хрупкое разрушение материала. Это явление обусловлено низкой пластической деформируемостью материала. Мгновенная локальная концентрация напряжений превышает предел прочности, что приводит к развитию микротрещин и сколу [36]. Дефект в области В (рисунок 4д), характеризуется потертостями в следствии трения и локальным термическим повреждением поверхности [37], указывающими на адгезионный износ. Механическая энергия преобразуется в тепловую, что при низкой теплопроводности материала приводит к неравномерному распределению тепла и локальному перегреву. По всей поверхности образца также наблюдаются микроцарапины, образованные при непрерывном контакте режущего инструмента (рисунок 4е) [35]. Поверхность, полученная после ультразвуковой обработки (рисунок 5). Основными наблюдаемыми характеристиками являются круглое углубление и следы вибрации. Круглое углубление (рисунок 5б, 5в) имеет округлую форму и значительную глубину, что принципиально отличает от структуры микротрещин, возникающих при традиционном резании. При увеличении фрагмента углубления в зоне Б (рисунок 5в) видны тонкий окисленный поверхностный слой и нерегулярные хрупкие сколы на границах углубления.

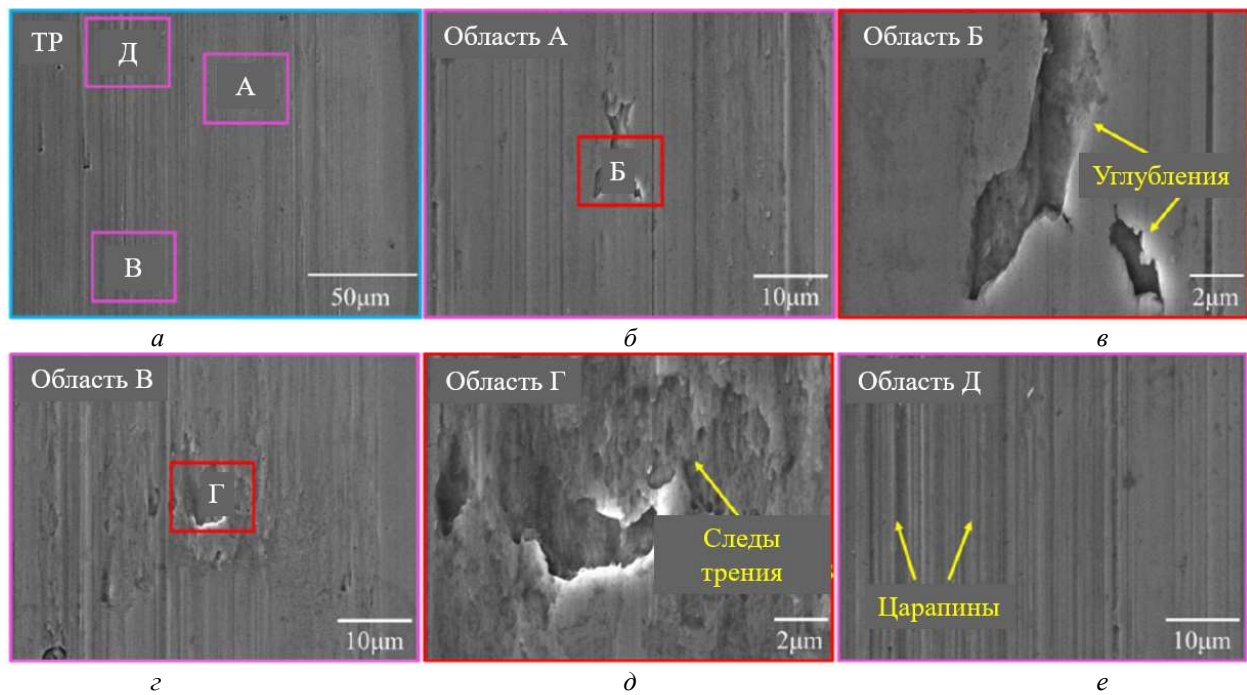


Рисунок 4 – Вид поверхности обработанного образца из высокоэнтропийного сплава при традиционном резании

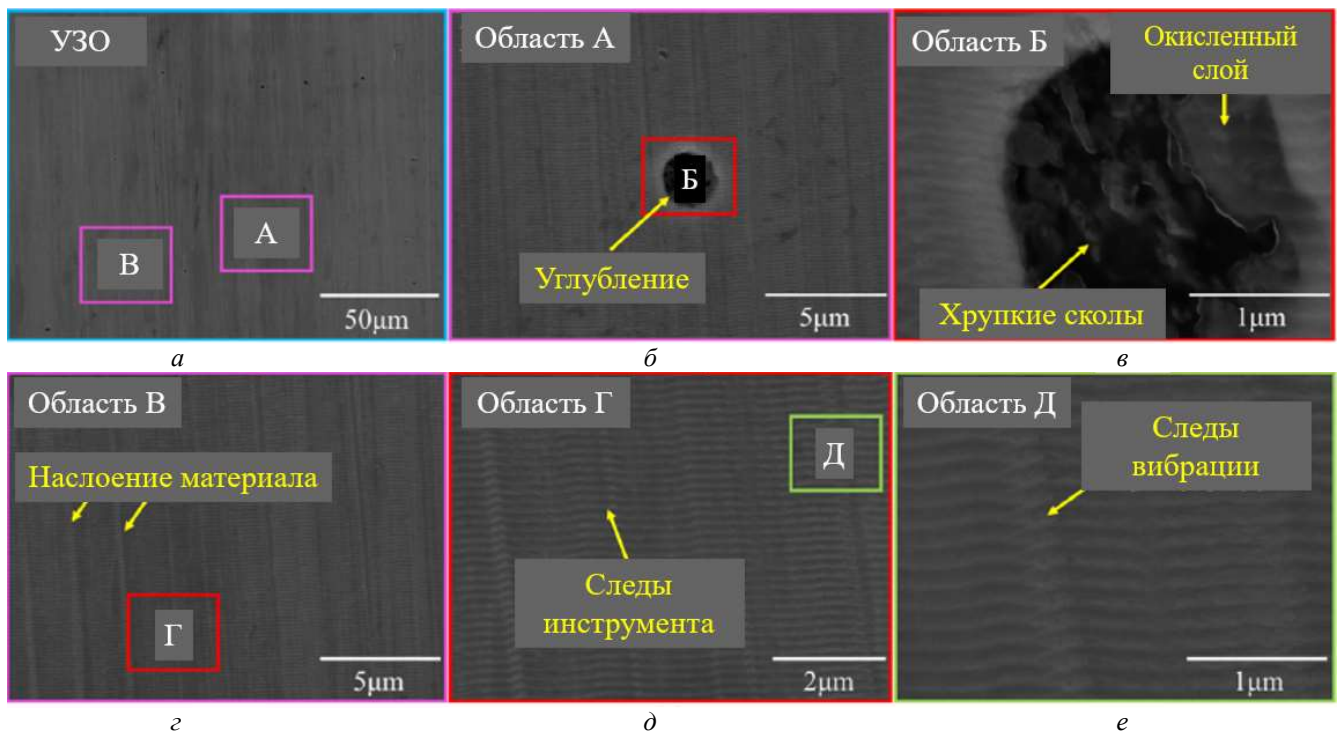


Рисунок 5 – Вид поверхности обработанного образца из высокоэнтропийного сплава при ультразвуковой обработке (УЗО)

Природа окисленного слоя и характер распределения микросколов указывают на возможное влияние структурных особенностей материала. Следы вибрации (рисунок 5г–е), формируются траекторией движения режущего инструмента. При каждом цикле колебаний инструмент оставляет микротопографический отпечаток на поверхности образца, накапливаясь в единый регулярный паттерн следов вибрации вдоль направления подачи. Помимо следов вибрации, прерывистое резание при ультразвуковой обработке создает пластические наслоения материала вдоль кромки инструмента (рисунок 5г), аналогичные наблюдаемым при традиционном резании. Эти наслоения образуются в результате пластического деформирования материала. Под сжимающим и срезающим воздействием

режущего инструмента материал заготовки течет в боковом направлении вдоль грани инструмента, формируя явление пластического бокового течения. Пересечение следов вибрации соседних проходов обработки (рисунок 5е) не приводит к потере качества поверхности. Сравнение обработанных поверхностей показывает, что ультразвуковая обработка значительно улучшает качество поверхности, повышает стабильность процесса резания по сравнению с традиционным резанием [35, 38, 39, 40, 41].

Эксперимент

Экспериментальное исследование проведено на высокоточном фрезерном станке ПРИЗМА 500АФЗ с числовым программным управлением, обеспечивающего позиционирование инструмента с точностью менее 1 мкм. Линейные двигатели обеспечивали плавное и точное позиционирование рабочих органов станка.

Обработка выполнялась в двух режимах: традиционное резание (ТР) без вибрационного воздействия и ультразвуковое вибрационное резание (УВР) с применением ультразвуковых колебаний инструмента. Оба режима проверялись при одинаковой подаче ($s = 4$ м/мин) и глубинах резания для обеспечения прямого сравнительного анализа влияния колебательного воздействия на процесс.

Для обеспечения воспроизводимости и высокой точности проведения исследования была проведена тщательная подготовка экспериментального стенда. Универсальное сборное приспособление (УСП) требовало выравнивания относительно оси Y координатной системы станка, которая совпадала с направлением вектора подачи режущего инструмента. Юстировка выполнялась с использованием прецизионного стрелочного индикатора часового типа (рисунок 6), позволяющего контролировать отклонения от параллельности с точностью не более 5 мкм. После достижения требуемого выравнивания приспособления образец закреплялся на УСП с ориентацией обрабатываемой поверхности параллельно направлению подачи инструмента.

Выбор операции строгания обоснован необходимостью достижения максимальной жесткости технологического оборудования, что критично для достоверности результатов при микрометровых глубинах резания. Общий вид приспособления и закрепленного образца (рисунок 7).

Траектория движения инструмента выполняла полуэллиптические движения с частотой колебаний 22,4 кГц.



Рисунок 6 – Пример выравнивания УСП

В качестве режущего инструмента использована пластина ISCAR TPGX 090204 треугольной формы с припаянным наконечником из поликристаллического алмаза (PCD). Геометрические параметры инструмента: главный передний угол 7° , главный задний угол 11° , радиус скругления режущей кромки $r = 0,4$ мм.

Параметры резания: исследование проведено при трех уровнях глубины резания: $t_1 = 10$ мкм, $t_2 = 20$ мкм, $t_3 = 30$ мкм, с двумя независимыми проходами инструмента (двумя канавками) на каждый уровень. Скорость резания V и подача s были одинаковы для обоих режимов (ТР и УВР) с целью обеспечения корректного сравнительного анализа.

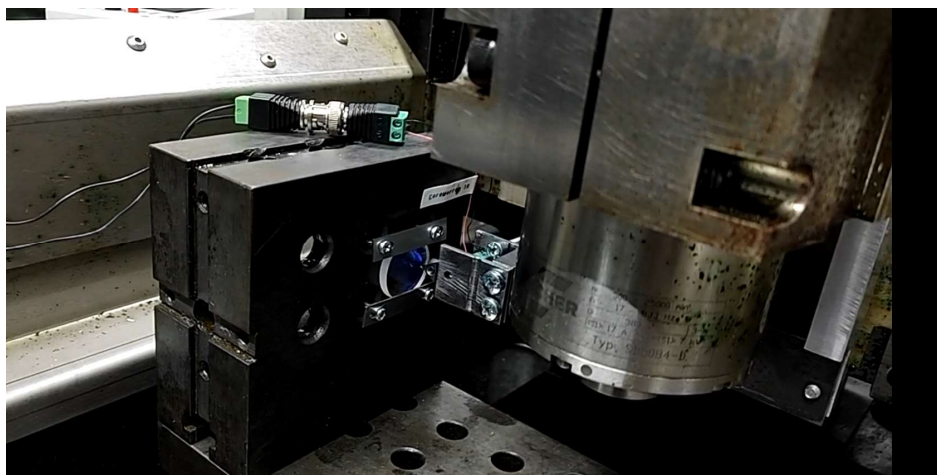


Рисунок 7 – Общий вид приспособления и закрепленного образца

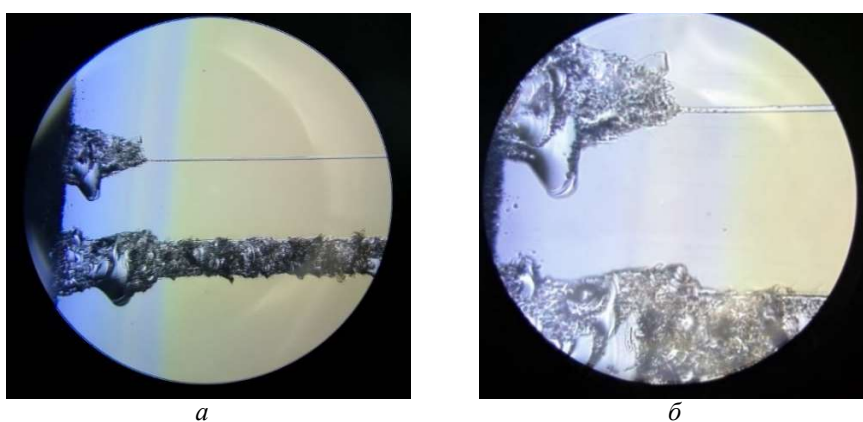


*Рисунок 8 – Вид обработанной канавки на глубине 10 мкм при:
а – 40 кратном увеличении; б – 100 кратном увеличении;*

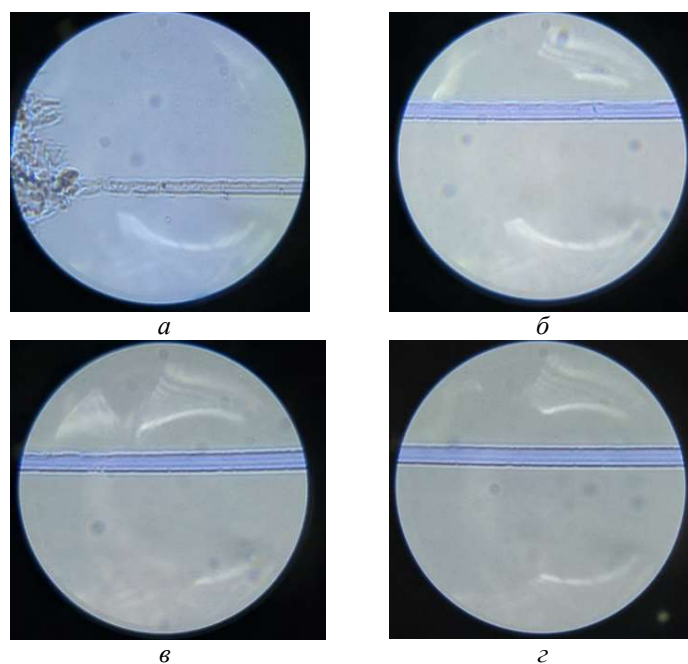


*Рисунок 9 – Вид обработанной канавки на глубине 10 мкм при 1000 кратном увеличении:
а – начало резания; б – начало переходного процесса; в – окончание переходного процесса; г – квазипластичное
резание (режим пластичного удаления)*

Структура поверхности при глубине резания $t = 10$ мкм (рисунок 8).

При традиционном резании поверхность обработанных канавок характеризуется преобладанием дефектов, свидетельствующих о хрупком разрушении материала – выявлены микротрещины и сколы поверхностного слоя.

При ультразвуковом резании (рисунок 9а–г) выявлена качественная трансформация механизма разрушения поверхности, происходящая в три последовательных этапа:

1) Начальный этап: локализованное хрупкое разрушение в начальной зоне резания;
2) Переходной этап: образование локальных микротрещин и микросколов по боковым краям канавки;

3) Установившийся этап: переход к режиму квазипластического резания материала.

Механизма перехода от хрупкого разрушения к режиму пластичного удаления указывает на эффективность ультразвукового колебательного воздействия в уменьшении локальных напряжений и снижения сил резания.

Структура поверхности при глубине резания $t = 20$ мкм (рисунок 10).

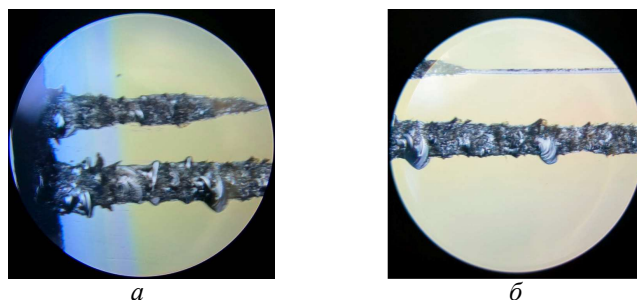


Рисунок 10 – Вид обработанной канавки на глубине 20 мкм при 40 кратном увеличении:
а – начала процесса резания; б – получение устоявшегося процесса

При увеличении глубины резания до 20 мкм при ультразвуковом вибрационном резании процесс разрушения остается преимущественно в переходном режиме с образованием микротрещин и микросколов поверхности преимущественно по краям. Однако наблюдается важное различие – дефекты не проникают вглубь материала, оставаясь локализованными в поверхностном слое, что предотвращает образование сколов. При традиционном резании наблюдаются более выраженные повреждения поверхности.

Структура поверхности при глубине резания $t = 30$ мкм (рисунок 11).

При ультразвуковом вибрационном резании поверхность демонстрирует хрупкое разрушение, однако дефекты остаются поверхностными, без глубокого проникновения трещин и крупных сколов. Кроме этого, наблюдается периодическое появление небольших сколов и микротрещин в середине канавки.

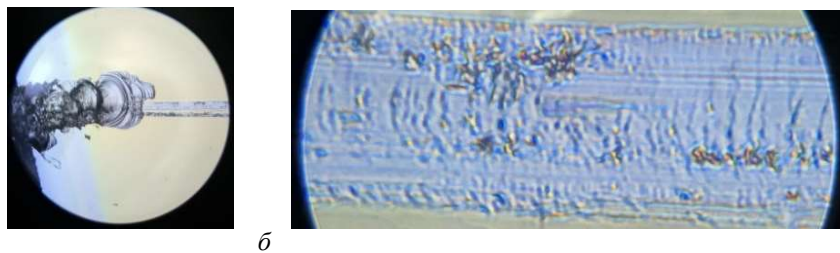


Рисунок 11 – Вид обработанной канавки на глубине 30 мкм при:
а – 40 кратном увеличении; б – 1000 кратном увеличении;

При традиционном резании на данной глубине произошел отказ режущего инструмента наблюдался скол режущей кромки пластины (рисунок 12).

Результаты экспериментального исследования демонстрируют, что ультразвуковое вибрационное резание эффективно изменяет механизм разрушения материала от хрупкого типа к переходному режиму с элементами квазипластического режима удаления.

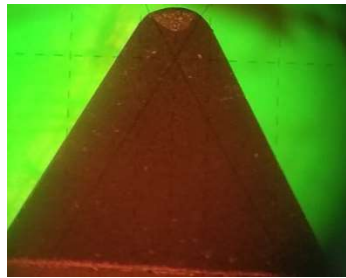


Рисунок 12 – Скол режущей кромки при 10 кратном увеличении

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование влияния ультразвуковых колебаний на процесс обработки оптического стекла определило фундаментальные различия в механизмах удаления материала при использовании и отсутствии колебаний.

Наложение ультразвуковых колебаний на инструмент изменяет механизм удаления материала образца переходя от хрупкого разрушения к режиму квазипластичного резания.

Данный переход достигается через циклическое механическое воздействие (с частотой 22,4 кГц) по полуэллиптической траектории, прерывающее накопление напряжений.

Ультразвуковая обработка обеспечивает повышение периода стойкости режущего инструмента, предотвращая отказы даже при повышенных нагрузках, где традиционная обработка показывает отрицательный результат.

Качество обработанной поверхности при ультразвуковой обработке характеризуется меньшим количеством глубоких дефектов (микротрещин и сколов) в сравнении с традиционным способом, что критично для оптических элементов, требующих нанометровой шероховатости и точности формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu K. Nanometric ductile cutting characteristics of silicon wafer using single crystal diamond tools / Liu K., Zuo D.W., Li X.P., et al. // Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena – 2009. – № 27(3) – pp. 1361–1366.
2. Pei Z.J. Grinding of silicon wafers: A review from historical perspectives / Pei Z.J., Fisher G.R., Liu J. // International Journal of Machine Tools and Manufacture – 2008. – № 48(12–13) – pp. 1297–1307.
3. Zhang S.J. Advances in ultra-precision machining of micro-structured functional surfaces and their typical applications / Zhang S.J., Zhou Y.P., Zhang H.J., Xiong Z.W., To S. // Int. J. Mach. Tool Manufact – 2019. – № 142 – pp. 16–41.
4. Yuan J.L. Review on the progress of ultra-precision machining technologies / Yuan J.L., Lyu B.H., Hang W., Deng Q.F. // Front. Mech. Eng. Proc. – 2017. – № 12 – pp. 158–180.
5. Zhang G.Q. Fabrication of hierarchical microgroove structures by vibration assisted end fly cutting / Zhang G.Q., Ma Y.T., Luo T., Cao S.K., Huang Z.J. // J. Mater. Process. Technol – 2023. – № 322 – pp. 118–164.
6. Antwi E.K., Liu K., Wang H. A review on ductile mode cutting of brittle materials / Antwi E.K., Liu K., Wang H. // Front. Mech. Eng. – 2018. – № 13(2) – pp. 251–263.
7. Yan J. Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining / Yan J., Asami T., Harada H., et al. // Precision Engineering – 2009. – № 33(4) – pp. 378–386.
8. Yan J. Crystallographic effect on subsurface damage formation in silicon microcutting / Yan J., Asami T., Harada H., et al. // CIRP Annals – 2012. – № 61(1) – pp. 131–134.
9. Liu K. Study of surface topography in nanometric ductile cutting of silicon wafers / Liu K., Li X.P., Rahman M., et al. // Proceedings of Electronics Packaging Technology Conference. Singapore: IEEE – 2002 – pp. 200–205.
10. Arefin S. The upper bound of tool edge radius for nanoscale ductile cutting of silicon wafer / Arefin S., Li X.P., Rahman M., et al. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology – 2007. – № 31(7–8) – pp. 655–662.
11. Nakasuji T. Diamond turning of brittle materials for optical components / Nakasuji T., Kodera S., Hara S., et al. // CIRP Annals-Manufacturing Technology – 1990. – № 39(1) – pp. 89–92.
12. Fang F.Z. Ultra-precision cutting for ZKN7 glass / Fang F.Z., Chen L.J. // CIRP Annals-Manufacturing Technology – 2000. – № 49(1) – pp. 17–20.
13. Schinker M.G. Subsurface damage mechanisms at high-speed ductile machining of optical glasses / Schinker M.G. // Precision Engineering – 1991. – № 13(3) – pp. 208–218.
14. Liu K. Characteristics of high speed micro cutting of tungsten carbide / Liu K., Li X.P., Rahman M. // Journal of Materials Processing Technology – 2003. – № 140(1–3) – pp. 352–357.
15. Tao G. Feed-direction ultrasonic vibration-assisted milling surface texture formation / Tao G., Ma C., Bai L., Shen X., Zhang J. // Mater. Manuf. Process – 2017. – № 32 – pp. 193–198.
16. Lin J. Development of a non-resonant 3D elliptical vibration cutting apparatus for diamond turning / Lin J., Lu M., Zhou X. // Exp. Tech – 2016. – № 40 – pp. 173–183.
17. Chern G.L. Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling / Chern G.L., Chang Y.C. // Int. J. Mach. Tools Manuf – 2006. – № 46 – pp. 659–666.

18. Peng Y. Effect of vibration on surface and tool wear in ultrasonic vibration-assisted scratching of brittle materials / Peng Y., Liang Z., Wu Y., Guo Y., Wang C. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol* – 2012. – № 59 – pp. 67–72.
19. Liu K. Characteristics of ultrasonic vibration-assisted ductile mode cutting of tungsten carbide / Liu K., Li X.P., Rahman M. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol* – 2008. – № 35 – pp. 833–841.
20. Xu W.X. Ultrasonic vibration-assisted machining: principle, design and application / Xu W.X., Zhang L.C. // *Adv. Manuf.* – 2015. – № 3 – pp. 173–192.
21. Shen X.H. Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy / Shen X.H., Zhang J.H., Li H., Wang J.J., Wang X.C. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol* – 2012. – № 63 – pp. 41–49.
22. Brehl D.E. Review of vibration-assisted machining / Brehl D.E., Dow T.A. // *Precis. Eng.* – 2008. – № 32 – pp. 153–172.
23. Niu Q.L. Study on force-thermal characteristics and cutting performance of titanium alloy milled by ultrasonic vibration and minimum quantity lubrication / Niu Q.L., Rong J., Jing L., et al. // *J. Manuf. Process* – 2023. – № 95 – pp. 115–130.
24. Xiao M. The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal / Xiao M., Sato K., Karube S., Soutome T. // *Int. J. Mach. Tool Manufact* – 2003. – № 13 – pp. 1375–1382.
25. Yang Z.C. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials / Yang Z.C., Zhu L.D., Zhang G.X., Ni C.B., Lin B. // *Int. J. Mach. Tool Manufact* – 2020. – № 156 – pp. 103–114.
26. Xing Y. Roughness model of an optical surface in ultrasonic assisted diamond turning / Xing Y., Liu Y., Yang C., Xue C. // *Appl. Opt* – 2020. – № 59 – pp. 922–933.
27. Zhang J.G. Enhanced machinability of Ni-based single crystal superalloy by vibration-assisted diamond cutting / Zhang J.G., Yuan H.X., Feng L.Q., et al. // *Precis. Eng.* – 2023. – № 79 – pp. 300–309.
28. Azarhoushang B. Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC / Azarhoushang B., Akbari J. // *Int. J. Mach. Tools Manuf* – 2007. – № 47 – pp. 1027–1033.
29. Zhou M. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration / Zhou M., Wang X.J., Ngoi B.K.A., Gan J.G.K. // *J. Mater. Process. Technol.* – 2002. – № 121 – pp. 243–251.
30. Zhang X.Q. Suppression of diamond tool wear with sub-millisecond oxidation in ultrasonic vibration cutting of steel / Zhang X.Q., Huang R., Wang Y., Liu K., Deng H., Neo D.W.K. // *J. Mater. Process. Technol* – 2022. – № 299 – pp. 117–130.
31. Skelton R.C. Turning with an oscillating tool / Skelton R.C. // *Int. J. Mach. Tool Des. Res.* – 1968. – № 8 – pp. 239–259.
32. Zhou M. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration / Zhou M., Wang X.J., Ngoi B.K.A., Gan J.G.K. // *J. Mater. Process. Technol.* – 2002. – № 121 – pp. 243–251.
33. Zhou M. Vibration-assisted precision machining of steel with PCD tools / Zhou M., Eow Y.T., Ngoi B.K.A., Lim E.N. // *Mater. Manuf. Process* – 2003. – № 18 – pp. 825–834.
34. Muhammad R. Analysis of a free machining $\alpha+\beta$ titanium alloy using conventional and ultrasonically assisted turning / Muhammad R., Hussain M.S., Maurotto A., et al. // *J. Mater. Process. Technol* – 2014. – № 214 – pp. 906–915.
35. Xing Y. Inhibiting surface and subsurface damage in ultrasonic vibration-assisted ultraprecision diamond cutting of high-entropy alloys / Xing Y., Liu Y., Li Y., et al. // *J. Mater. Res. Technol* – 2024. – № 34 – pp. 880–897.
36. Li W.D. Fracture resistance of high entropy alloys: a review / Li W.D., Liaw P.K., Gao Y.F. // *Intermetallics* – 2018. – № 99 – pp. 69–83.
37. Liang X.L. Micro/nano incremental material removal mechanisms in high-frequency ultrasonic vibration-assisted cutting of 316L stainless steel / Liang X.L., Zhang C.B., Cheung C., et al. // *Int. J. Mach. Tool Manufact* – 2023. – № 191 – pp. 104–124.
38. Zhang C.B. Theoretical and experimental investigation of ultrasonic cutting kinematics and its effect on chip formation and surface generation in high-frequency ultrasonic vibration-assisted diamond cutting / Zhang C.B., Liang X.L., Cheung C.F., Wang C.J., Bulla B.J. // *J. Mater. Res. Technol* – 2024. – № 30 – pp. 5662–5676.
39. He C.L. A theoretical and deep learning hybrid model for predicting surface roughness of diamond-turned polycrystalline materials / He C.L., Yan J.W., Wang S.Q., et al. // *Int. J. Extrem. Manuf* – 2023. – № 5 – pp. 135–162.
40. He C.L. An accurate 3D surface topography model for single-point diamond turning / He C.L., Zong W.J., Xue C.X., Sun T. // *Int. J. Mach. Tool Manufact* – 2018. – № 134 – pp. 42–68.
41. Xing Y.T. Ductile-brittle coupled cutting of a single-crystal silicon by ultrasonic assisted diamond turning / Xing Y.T., Liu Y., Li C., Yang C., Xue C.X. // *Opt. Express* – 2021. – № 29 – pp. 23847–23863.

Образцов Александр Евгеньевич
АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», г.
Москва
Начальник конструкторского
отдела
АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»
105005, г. Москва, ул. 2-я
Бауманская, 5, стр. 1
E-mail: obrazcow2@mail.ru

Утенков Владимир Михайлович
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г.
Москва
Профессор кафедры
«Металлорежущие станки»
105005, г. Москва, ул. 2-я
Бауманская, 5, стр. 1
E-mail: utencov@bmstu.ru

Кузнецов Павел Михайлович
Московский авиационный
институт (национальный
исследовательский университет),
г. Москва
Профессор кафедры «Системное
моделирование и
автоматизированное
проектирование»
125080, г. Москва, ул.
Волоколамское шоссе, 4
E-mail: profpol@rambler.ru

OBRATSOV A.E., UTENKOV V.M., KUZNETSOV P.M.

THE EFFECT OF ULTRASONIC VIBRATIONS OF THE CUTTING EDGE OF THE TOOL ON THE QUALITY OF THE TREATED SURFACE OF BRITTLE MATERIALS

Abstract. *The paper presents the results of an experimental study of ultrasonic vibration cutting of optical glass using a high-precision CNC milling machine PRISMA-500AF3. The processing was performed in two modes: traditional cutting and ultrasonic processing at an oscillation frequency of 22.4 kHz at three cutting depths of 10 microns, 20 microns and 30 microns. The structure of the groove surface is analyzed with respect to the mechanism of material removal (brittle fracture, transient mode, quasi-plasticity treatment). It is shown that when ultrasonic vibrations are used, the removal mechanism is transformed from a predominant brittle fracture to a quasi-plastic one, while with increasing cutting depth, the transition region expands, and defects remain in the surface layer even at a depth of 30 microns. Unlike traditional cutting, in which pronounced microcracks, chipping and tool failure are observed at maximum cutting depth, ultrasonic processing reduces the intensity of microcracking, increases the durability of the cutting tool and improves the quality of the treated surface. The results obtained confirm the expediency of using ultrasonic vibration cutting to improve the accuracy and quality of optical glass surface treatment.*

Keywords: *machining quality management, ultrasonic cutting, ultrasonic vibrations of the tool, processing of brittle materials, oscillating movements of the tool, blade processing of brittle material, quasi-plastic cutting.*

BIBLIOGRAPHY

1. Liu K. Nanometric ductile cutting characteristics of silicon wafer using single crystal diamond tools / Liu K., Zuo D.W., Li X.P., et al. // Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena – 2009. – № 27(3) – pp. 1361–1366.
2. Pei Z.J. Grinding of silicon wafers: A review from historical perspectives / Pei Z.J., Fisher G.R., Liu J. // International Journal of Machine Tools and Manufacture – 2008. – № 48(12–13) – pp. 1297–1307.
3. Zhang S.J. Advances in ultra-precision machining of micro-structured functional surfaces and their typical applications / Zhang S.J., Zhou Y.P., Zhang H.J., Xiong Z.W., To S. // Int. J. Mach. Tool Manufact – 2019. – № 142 – pp. 16–41.
4. Yuan J.L. Review on the progress of ultra-precision machining technologies / Yuan J.L., Lyu B.H., Hang W., Deng Q.F. // Front. Mech. Eng. Proc. – 2017. – № 12 – pp. 158–180.
5. Zhang G.Q. Fabrication of hierarchical microgroove structures by vibration assisted end fly cutting / Zhang G.Q., Ma Y.T., Luo T., Cao S.K., Huang Z.J. // J. Mater. Process. Technol – 2023. – № 322 – pp. 118–164.
6. Antwi E.K., Liu K., Wang H. A review on ductile mode cutting of brittle materials / Antwi E.K., Liu K., Wang H. // Front. Mech. Eng. – 2018. – № 13(2) – pp. 251–263.
7. Yan J. Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining / Yan J., Asami T., Harada H., et al. // Precision Engineering – 2009. – № 33(4) – pp. 378–386.
8. Yan J. Crystallographic effect on subsurface damage formation in silicon microcutting / Yan J., Asami T., Harada H., et al. // CIRP Annals – 2012. – № 61(1) – pp. 131–134.
9. Liu K. Study of surface topography in nanometric ductile cutting of silicon wafers / Liu K., Li X.P., Rahman M., et al. // Proceedings of Electronics Packaging Technology Conference. Singapore: IEEE – 2002 – pp. 200–205.
10. Arefin S. The upper bound of tool edge radius for nanoscale ductile cutting of silicon wafer / Arefin S., Li X.P., Rahman M., et al. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology – 2007. – № 31(7–8) – pp. 655–662.
11. Nakasuji T. Diamond turning of brittle materials for optical components / Nakasuji T., Koder S., Hara S., et al. // CIRP Annals-Manufacturing Technology – 1990. – № 39(1) – pp. 89–92.
12. Fang F.Z. Ultra-precision cutting for ZKN7 glass / Fang F.Z., Chen L.J. // CIRP Annals-Manufacturing Technology – 2000. – № 49(1) – pp. 17–20.
13. Schinker M.G. Subsurface damage mechanisms at high-speed ductile machining of optical glasses / Schinker M.G. // Precision Engineering – 1991. – № 13(3) – pp. 208–218.
14. Liu K. Characteristics of high speed micro cutting of tungsten carbide / Liu K., Li X.P., Rahman M. // Journal of Materials Processing Technology – 2003. – № 140(1–3) – pp. 352–357.
15. Tao G. Feed-direction ultrasonic vibration-assisted milling surface texture formation / Tao G., Ma C., Bai L., Shen X., Zhang J. // Mater. Manuf. Process – 2017. – № 32 – pp. 193–198.
16. Lin J. Development of a non-resonant 3D elliptical vibration cutting apparatus for diamond turning / Lin J., Lu M., Zhou X. // Exp. Tech – 2016. – № 40 – pp. 173–183.
17. Chern G.L. Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling / Chern G.L., Chang Y.C. // Int. J. Mach. Tools Manuf – 2006. – № 46 – pp. 659–666.
18. Peng Y. Effect of vibration on surface and tool wear in ultrasonic vibration-assisted scratching of brittle materials / Peng Y., Liang Z., Wu Y., Guo Y., Wang C. // Int. J. Adv. Manuf. Technol – 2012. – № 59 – pp. 67–72.
19. Liu K. Characteristics of ultrasonic vibration-assisted ductile mode cutting of tungsten carbide / Liu K., Li X.P., Rahman M. // Int. J. Adv. Manuf. Technol – 2008. – № 35 – pp. 833–841.
20. Xu W.X. Ultrasonic vibration-assisted machining: principle, design and application / Xu W.X., Zhang L.C. // Adv. Manuf. – 2015. – № 3 – pp. 173–192.
21. Shen X.H. Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy / Shen X.H., Zhang J.H., Li H., Wang J.J., Wang X.C. // Int. J. Adv. Manuf. Technol – 2012. – № 63 – pp. 41–49.
22. Brehl D.E. Review of vibration-assisted machining / Brehl D.E., Dow T.A. // Precis. Eng. – 2008. – № 32 – pp. 153–172.

23. Niu Q.L. Study on force-thermal characteristics and cutting performance of titanium alloy milled by ultrasonic vibration and minimum quantity lubrication / Niu Q.L., Rong J., Jing L., et al. // J. Manuf. Process – 2023. – № 95 – pp. 115–130.
24. Xiao M. The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal / Xiao M., Sato K., Karube S., Soutome T. // Int. J. Mach. Tool Manufact – 2003. – № 13 – pp. 1375–1382.
25. Yang Z.C. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials / Yang Z.C., Zhu L.D., Zhang G.X., Ni C.B., Lin B. // Int. J. Mach. Tool Manufact – 2020. – № 156 – pp. 103–114.
26. Xing Y. Roughness model of an optical surface in ultrasonic assisted diamond turning / Xing Y., Liu Y., Yang C., Xue C. // Appl. Opt – 2020. – № 59 – pp. 922–933.
27. Zhang J.G. Enhanced machinability of Ni-based single crystal superalloy by vibration-assisted diamond cutting / Zhang J.G., Yuan H.X., Feng L.Q., et al. // Precis. Eng – 2023. – № 79 – pp. 300–309.
28. Azarhoushang B. Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC / Azarhoushang B., Akbari J. // Int. J. Mach. Tools Manuf – 2007. – № 47 – pp. 1027–1033.
29. Zhou M. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration / Zhou M., Wang X.J., Ngoi B.K.A., Gan J.G.K. // J. Mater. Process. Technol – 2002. – № 121 – pp. 243–251.
30. Zhang X.Q. Suppression of diamond tool wear with sub-millisecond oxidation in ultrasonic vibration cutting of steel / Zhang X.Q., Huang R., Wang Y., Liu K., Deng H., Neo D.W.K. // J. Mater. Process. Technol – 2022. – № 299 – pp. 117–130.
31. Skelton R.C. Turning with an oscillating tool / Skelton R.C. // Int. J. Mach. Tool Des. Res. – 1968. – № 8 – pp. 239–259.
32. Zhou M. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration / Zhou M., Wang X.J., Ngoi B.K.A., Gan J.G.K. // J. Mater. Process. Technol. – 2002. – № 121 – pp. 243–251.
33. Zhou M. Vibration-assisted precision machining of steel with PCD tools / Zhou M., Eow Y.T., Ngoi B.K.A., Lim E.N. // Mater. Manuf. Process – 2003. – № 18 – pp. 825–834.
34. Muhammad R. Analysis of a free machining $\alpha+\beta$ titanium alloy using conventional and ultrasonically assisted turning / Muhammad R., Hussain M.S., Maurotto A., et al. // J. Mater. Process. Technol – 2014. – № 214 – pp. 906–915.
35. Xing Y. Inhibiting surface and subsurface damage in ultrasonic vibration-assisted ultraprecision diamond cutting of high-entropy alloys / Xing Y., Liu Y., Li Y., et al. // J. Mater. Res. Technol – 2024. – № 34 – pp. 880–897.
36. Li W.D. Fracture resistance of high entropy alloys: a review / Li W.D., Liaw P.K., Gao Y.F. // Intermetallics – 2018. – № 99 – pp. 69–83.
37. Liang X.L. Micro/nano incremental material removal mechanisms in high-frequency ultrasonic vibration-assisted cutting of 316L stainless steel / Liang X.L., Zhang C.B., Cheung C., et al. // Int. J. Mach. Tool Manufact – 2023. – № 191 – pp. 104–124.
38. Zhang C.B. Theoretical and experimental investigation of ultrasonic cutting kinematics and its effect on chip formation and surface generation in high-frequency ultrasonic vibration-assisted diamond cutting / Zhang C.B., Liang X.L., Cheung C.F., Wang C.J., Bulla B.J. // J. Mater. Res. Technol – 2024. – № 30 – pp. 5662–5676.
39. He C.L. A theoretical and deep learning hybrid model for predicting surface roughness of diamond-turned polycrystalline materials / He C.L., Yan J.W., Wang S.Q., et al. // Int. J. Extrem. Manuf – 2023. – № 5 – pp. 135–162.
40. He C.L. An accurate 3D surface topography model for single-point diamond turning / He C.L., Zong W.J., Xue C.X., Sun T. // Int. J. Mach. Tool Manufact – 2018. – № 134 – pp. 42–68.
41. Xing Y.T. Ductile-brittle coupled cutting of a single-crystal silicon by ultrasonic assisted diamond turning / Xing Y.T., Liu Y., Li C., Yang C., Xue C.X. // Opt. Express – 2021. – № 29 – pp. 23847–23863.

Obraztsov Alexander Evgenievich
JSC "VNIINSTUMENT", Moscow
Head of the Design Department of
JSC "VNIINSTUMENT"
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya
str., 5, building 1
E-mail: obrazcow2@mail.ru

Utenkov Vladimir Mikhailovich
Bauman Moscow State Technical
University, Moscow
Professor of the Department of
"Metal Cutting machines"
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya
str., 5, p. 1
E-mail: utencov@bmstu.ru

Kuznetsov Pavel Mikhailovich
Moscow Aviation Institute (National
Research University), Moscow
Professor of the Department of
"System Modeling and Computer-
aided Design"
125080, Moscow, st. Volokolamsk
highway, 4
E-mail: profpol@rambler.ru

© Образцов А.Е., Утенков В.М., Кузнецов П.М., 2026

СЕФЕДИН И.Д., ЯГЪЯЕВ Э.Э.

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЕГО РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация. В статье представлена разработка и исследование комбинированного метода повышения износостойкости металлорежущего инструмента, заключающаяся в предварительной лазерной абляции наносекундными импульсами и последующее нанесение дискретного диффузионного покрытия. Обоснована научная гипотеза о достижении синергетического эффекта за счет формирования адаптивной микроструктуры с градиентными свойствами. Описаны технологические основы обоих процессов: определены оптимальные режимы лазерной обработки для стали Р6М5 и условия формирования дискретного оксидного слоя с использованием активированного ионизированного воздушного потока. Показано, что лазерная абляция создает на поверхности специфическую микротекстуру, повышающую адгезию покрытия и формирующую промежуточный упрочненный слой. Дискретное покрытие, в свою очередь, обеспечивает эффективную релаксацию термических напряжений. Результатом совместного применения методов является формирование композиционной поверхностной системы «основа – промежуточный слой – покрытие», которая в 2–3 раза увеличивает срок службы инструмента за счет повышения износостойкости и сохранения необходимой пластичности основы.

Ключевые слова: износостойкость, металлорежущий инструмент, лазерная абляция, дискретное диффузионное покрытие, комбинированное модифицирование, поверхностный слой.

Введение

Износ инструмента остается одной из основных причин снижения качества продукции и увеличения производственных затрат. Инструмент является слабым звеном технологических производственных процессов, во многом сдерживающим их более интенсивное развитие, что делает особо актуальными глобальные усилия по разработке инновационных высокоэффективных инструментальных материалов и конструкций режущего инструмента. Получение износостойких покрытий и пленок на режущем инструменте один из наиболее эффективных и актуальных способов существенного повышения основных эксплуатационных возможностей современного металлорежущего инструмента.

Традиционные методы улучшения свойств инструмента, такие как нанесение покрытий или термическая обработка, имеют ограничения, а в некоторых случаях требуют существенных вложений. Например, однослойные покрытия подвержены растрескиванию и скалыванию, а традиционные методы упрочнения не обеспечивают комплексного повышения стойкости к износу, коррозии и термическим нагрузкам.

Анализ литературы. Повышение износостойкости режущего инструмента достигается применением различных методов поверхностно-упрочняющей обработки, нанесением защитных покрытий и модификацией поверхностного слоя [1–6].

Применение износостойких покрытий уменьшает процессы трения, повышает твердость и износостойкость поверхностного слоя инструмента. Износостойкие покрытия являются эффективным способом повышения теплостойкости и снижения отвода тепла в режущий инструмент [2].

Влияния термической и лазерной обработки поверхности на упрочнение металлов и сплавов исследованы в работах авторов [7–9].

Среди разнообразия инновационных технологий перспективными представляются применения лазерной абляции и диффузионных покрытий.

Лазерная абляция позволяет модифицировать микроструктуру поверхности, повышая ее адгезию и механическую прочность [10–17]. Современные лазерные технологии позволяют вести обработку в требуемом диапазоне с различной мощностью и временем воздействия лазерного излучения на обрабатываемый материал [18–20]. В сочетании с дискретными диффузионными покрытиями это дает возможность обеспечить более равномерное распределение нагрузки и значительно повысить износостойкость инструмента от 1,5 до 4 раз по сравнению с аналогами [21].

Увеличение срока службы металлорежущего инструмента снижает затраты на его замену, уменьшает простой оборудования и повышает общую эффективность производства. Это особенно важно для предприятий с крупносерийным и массовым производством.

Несмотря на очевидные преимущества, вопросы совмещения лазерной обработки и нанесения дискретных покрытий остаются недостаточно изученными. Это требует глубокого анализа и экспериментальной проверки для разработки эффективной технологии [22].

Комплексное использование лазерной абляции и дискретных диффузионных покрытий представляет собой новый подход расширения технологических возможностей лезвийной обработки, который имеет высокую научную и практическую значимость, позволяя создать универсальные решения для широкого спектра металлорежущих инструментов при различных условиях обработки [23].

Цель работы: повышение износостойкости металлорежущего инструмента на основе комбинированной технологии обработки лазерными импульсами наносекундной длительности с нанесением дискретного диффузионного покрытия.

Основная часть

Научная гипотеза заключается в комбинации лазерной абляции и дискретных покрытий, что позволит реализовать синергетический эффект за счет формирования адаптивной микроструктуры, снижающей концентрацию напряжений, создания зон с градиентными свойствами «основа–покрытие» и локального изменения фазового состава поверхностного слоя.

Современные требования к режущим инструментам диктуют необходимость сочетания высокой износостойкости с сохранением пластичности основы инструмента. Решить эту задачу можно комбинированным методом, включающим предварительную лазерную абляцию поверхности с последующим нанесением дискретного диффузионного покрытия. Такой подход позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики инструмента за счет синергетического эффекта взаимодействия двух методов обработки.

Лазерная абляция создает на поверхности инструмента определенную микротекстуру с заданными параметрами шероховатости (рисунок 1), что способствует увеличению площади контакта и улучшению адгезионных свойств покрытия.

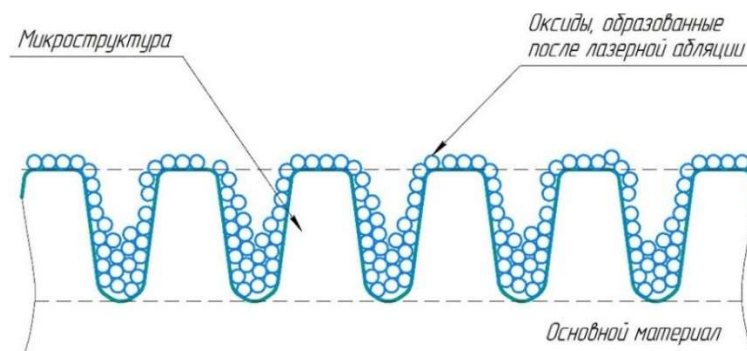


Рисунок 1 – Схема образования микроструктуры и оксидов на поверхности инструмента после лазерной абляции

В результате лазерной абляции формируется структура, состоящая из:

- 1) оксидного пористого слоя, с трещинами и неравномерным распределением фаз;
- 2) микроструктурированного основного материала.

Локальный лазерный нагрев приводит к реакциям с кислородом воздуха и образованию оксидов, но из-за высокой скорости охлаждения они имеют дефекты. Неоднородность структуры после обработки приводит к термическим напряжениям, которые могут вызвать микротрещины. Кроме того, лазерная обработка активизирует поверхность за счет очистки и создания дефектов в кристаллической решетке, что ускоряет последующую диффузию элементов покрытия. Стоит отметить, что без последующего диффузионного покрытия оксидный слой уязвим к эрозии и термической усталости.

Процесс лазерной абляции позволяет получить микроструктуру, которая способствует адгезии последующего диффузионного покрытия. Микро- и нанорельеф служит «якорем» для оксидов (рисунок 2). Важным аспектом является формирование сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое, что снижает риск хрупкого разрушения инструмента в процессе эксплуатации.

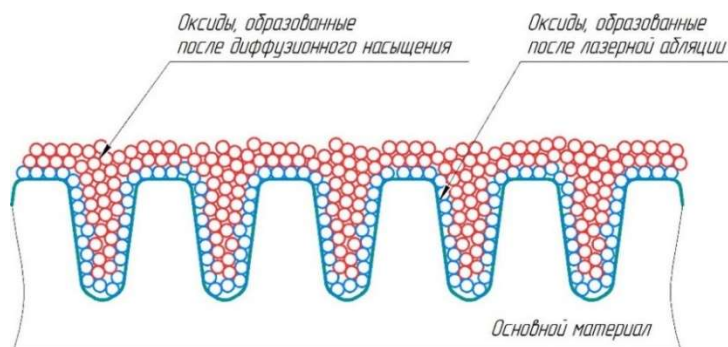


Рисунок 2 – Схема образования микроструктуры и оксидов на поверхности инструмента после лазерной абляции, с последующим образованием оксидов после диффузионного насыщения

В результате диффузионного насыщения формируется структура, состоящая из:

- 1) верхнего однородного слоя с мелкозернистой структурой;
- 2) промежуточного слоя с неоднородными включениями;
- 3) «подложки» основного материала.

Высокая температура во время лазерной абляции приводит к термодинамическим эффектам, что активирует поверхность, ускоряя последующее диффузионное насыщение.

Переход от оксидов дискретного диффузионного покрытия к оксидам на поверхности после лазерной абляции обеспечивает плавное изменение коэффициента термического расширения, снижая напряжение.

Комбинация лазерной абляции и дискретного диффузионного покрытия образует более стабильную и износостойкую структуру за счет синергии методов.

Особое значение имеет промежуточный слой, образующийся при лазерной абляции (рисунок 3). Этот слой выполняет несколько важных функций: обеспечивает плавный переход механических свойств от основы к покрытию, снижает градиент термических напряжений и способствует более равномерному распределению эксплуатационных нагрузок. Толщина промежуточного слоя обычно составляет 5...15 мкм, а его структура характеризуется повышенной плотностью дислокаций и наличием нанокристаллических фаз.

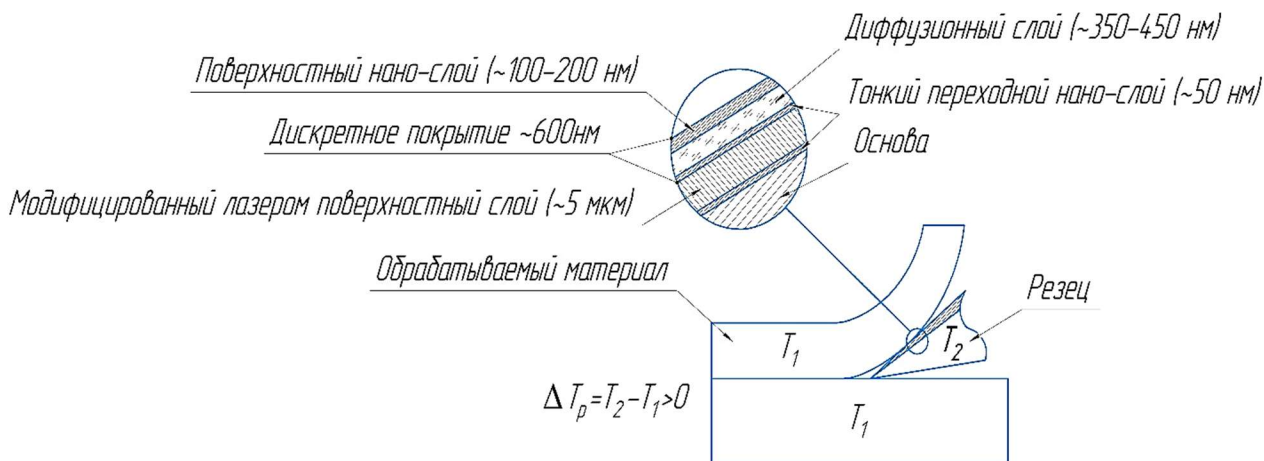


Рисунок 3 – Структура комбинированного покрытия

Дискретное диффузионное покрытие, нанесенное на подготовленную лазером поверхность, имеет ряд преимуществ перед сплошными покрытиями. Чередование зон с покрытием и без покрытия позволяет существенно снизить уровень остаточных напряжений, возникающих в процессе нанесения. Мягкие включения (зоны без покрытия) эффективно компенсируют разницу коэффициентов термического расширения покрытия и основы, что особенно важно при работе инструмента в условиях переменных термических нагрузок. Экспериментально установлено, что локальные деформации в такой системе не приводят к катастрофическому разрушению всего покрытия.

Структура дискретного покрытия, нанесенного на модифицированную лазерной абляцией поверхность, имеет четко выраженную слоистую организацию. Верхний нано слой толщиной 200...500 нм обеспечивает высокую износостойкость и стойкость к усталостному

разрушению. Диффузионный слой толщиной 1...3 мкм отвечает за повышение жесткости инструмента при сохранении необходимого запаса пластичности. Особое значение имеет тонкий переходный слой (50...100 нм), который обеспечивает химическую совместимость покрытия с основой инструмента.

Технология нанесения покрытия с использованием активированного воздушного потока позволяет получать покрытия с преобладанием нитридных и карбидных фаз. Ионизация в коронном разряде генерирует реакционноспособные частицы (N^+ , O^-), которые взаимодействуют с материалом инструмента, образуя упрочняющие соединения. Состав и свойства покрытия могут меняться в зависимости от химического состава инструментального материала [21].

Оптимизация параметров обработки является ключевым фактором успешного применения комбинированного метода. Для лазерной абляции это отношение мощности излучения к скорости обработки. Для покрытия, плотность дискретных ячеек рекомендуется поддерживать на уровне 60–70 %, что обеспечивает оптимальный баланс прочностных и пластичных характеристик.

Использование комбинированного метода обработки позволит увеличить срок службы режущего инструмента в 2–3 раза по сравнению с традиционными методами упрочнения. Значительное снижение термоусталостного износа достигается за счет эффективной релаксации напряжений в системе «основа – промежуточный слой – покрытие». При этом сохраняется требуемая пластичность основы инструмента, что особенно важно при работе с ударными нагрузками.

На первом этапе экспериментальные исследования модифицирования поверхности методом лазерной абляции были проведены на установке «FMark–100 NS» с волоконным иттербиевым лазером, IPG Photonics (рисунок 4) рабочая длина волны излучения – 1,064 мкм, максимальная мощность – 100 Вт.

На основе полученных моделей в работе [22], [24] были установлены граничные технологические режимы для проведения экспериментальных исследований лазерной абляции быстрорежущей стали Р6М5, твердосплавных пластин из сплавов ВК и Т15К6 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Граничные технологические режимы обработки при лазерной абляции

№	Мощность импульса P , Вт	Частота импульса f , кГц	Схема сканирования
1	5 – 35	10 – 150	Параллельное/Перекрёстное

Режимы лазерной абляции пластин представлены в таблице 2.

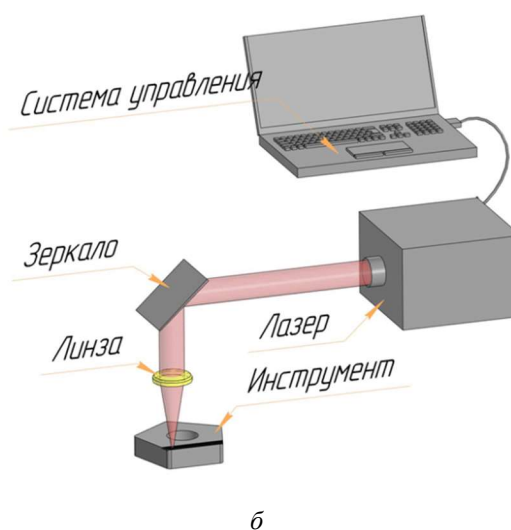


Рисунок 4 – Модифицирование поверхности методом лазерной абляции:

а – экспериментальная установка на основе волоконного иттербиевого лазера «FMark–100 NS»;
б – схема обработки металлорежущего инструмента лазерным излучением

Следует отметить, что обработка проводилась методом параллельного (непересекающегося) воздействия на поверхность образцов. Последующий анализ

обработанных лазером поверхностей и микрофотографирование проводились с использованием сканирующей электронной микроскопии на установке TESCAN MIRA3. На рисунке 5 представлен внешний вид обработанной поверхности при увеличении разной кратности.

Таблица 2 – Режимы лазерной абляции пластин

№	Материал пластины	Мощность импульса $P, Вт$	Скорость обработки $V, мм/с$	Частота импульса $f, кГц$	Длительность импульсов, τ нс	Шаг абляции $лин/мм$	Количество циклов обработки
1	P6M5	8	100	40	10	40	50
2	P6M5	10	100	40	10	40	50

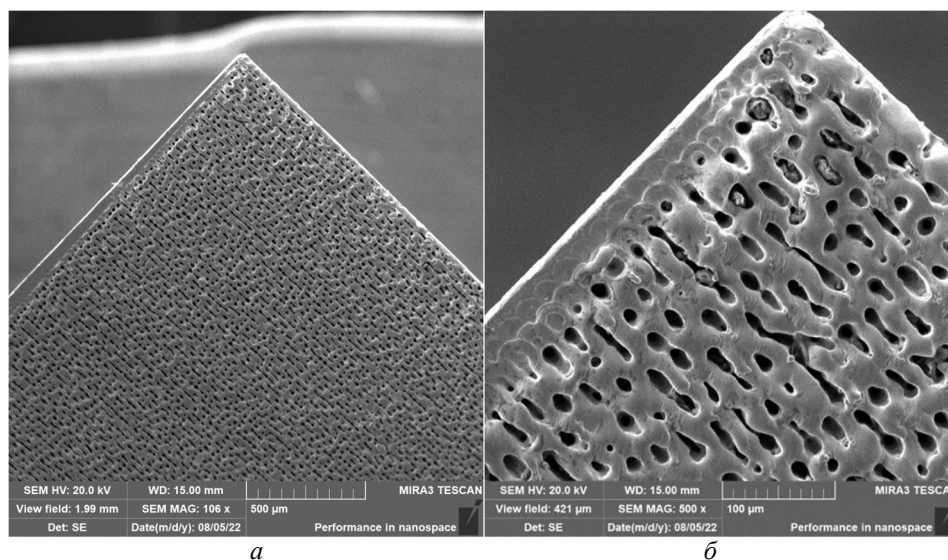


Рисунок 5 – Электронные микрофотографии поверхности пластины стали P6M5 после обработки:
а – 106-кратное увеличение; б – 500-кратное увеличение

На втором этапе выполнялось формирование дискретного диффузионного покрытия на поверхностях, предварительно активированных методом лазерной абляции. Данный процесс основан на двух основных принципах: создании условий для интенсивного диффузионного насыщения активированного поверхностного слоя и формировании упорядоченной системы изолированных локальных областей покрытия.

Технологическая реализация первого принципа достигается с помощью направленного потока воздуха, активированного в зоне униполярного коронного разряда при атмосферном давлении. Для экспериментальной реализации разработанной технологии формирования дискретного диффузионного покрытия была применена установка, собранная на базе устройства для создания ионизированного воздушного потока «УИВ-1». Устройство формирует на поверхности образца локальную область диффузионного покрытия, а электромеханический блок позволял создавать упорядоченную совокупность таких областей, разделённых промежутками без покрытия [25]. Полученная структура определена в работе как дискретное покрытие. Внешний вид применённой в исследованиях установки представлен на рисунке 6.

Выбор технологических параметров для нанесения дискретного диффузионного покрытия основывался на результатах системного исследования влияния геометрических и физических факторов процесса на конечные эксплуатационные свойства модифицированного инструмента представленных в работе Чекаловой Е.А. [26]. Проведённые исследования позволили установить и обосновать оптимальные технологические параметры процесса. Наилучшие эксплуатационные свойства (минимальный износ) достигаются при геометрических параметрах: расстоянии от сопла до поверхности 12 мм и угле наклона сопла 75°. В качестве базового физического режима приняты: напряжение 60 кВ, сила тока 770 мА, давление воздуха 3,2 Па и время обработки 60 минут. Данный комплекс условий обеспечивает равномерное формирование диффузионного слоя, максимальную адгезию и воспроизводимость результатов для различных инструментальных материалов.

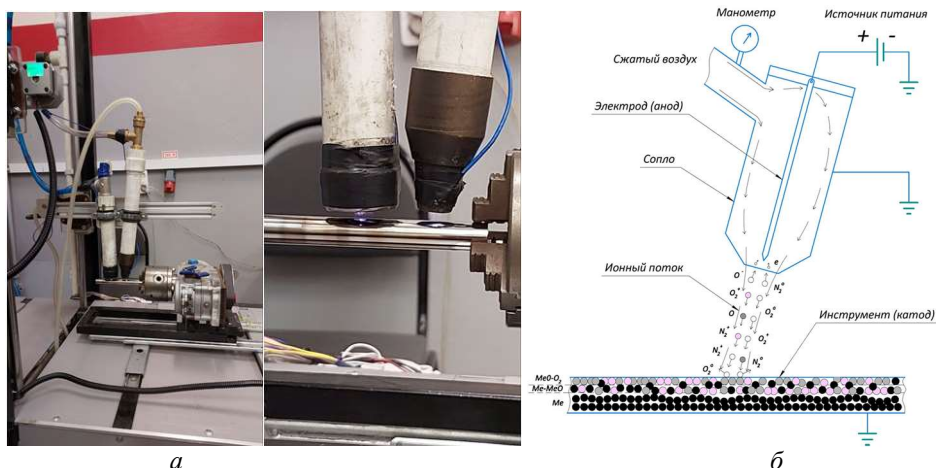


Рисунок 6 – Нанесение дискретного диффузионного покрытия:
 а – установка для синтеза дискретного диффузионного оксидного слоя;
 б – технологическая схема нанесения дискретного диффузионного покрытия

Механизм формирования дискретного оксидного слоя является индивидуальным для каждого инструментального материала и определяется его химическим составом и термодинамическими свойствами. На подготовленной лазером поверхности процесс инициируется хемосорбцией кислорода. Последующий ионный перенос через зарождающуюся оксидную плёнку, ускоренный внутренним электрическим полем, приводит к направленной миграции катионов металла. Для стали Р6М5 это сопровождается формированием последовательности оксидов железа (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4), что приводит к увеличению удельного объёма поверхностного слоя и формированию упрочняющих сжимающих напряжений [26].

Совместное применение лазерной абляции и дискретного диффузионного покрытия направлено на достижение синергетического эффекта, который реализуется через комплекс взаимосвязанных физико-механических процессов. Микрорельеф, сформированный в результате лазерного воздействия, обеспечивает повышение адгезии покрытия за счёт эффекта механического зацепления, увеличивая площадь контакта и создавая благоприятные условия для химического взаимодействия на межфазной границе. Одновременно ячеистая структура дискретного покрытия способствует эффективной релаксации термических и остаточных напряжений, минимизируя риск их концентрации, характерный для сплошных покрытий, благодаря компенсации разности коэффициентов термического расширения материала основы и покрытия в зонах между упрочнёнными ячейками. Комбинированное воздействие приводит к формированию градиентного переходного слоя с плавным изменением химического состава и механических свойств от пластичной основы к твёрдому покрытию, что повышает сопротивление усталостному и хрупкому разрушению. Таким образом, локальное упрочнение в дискретных зонах сочетается с сохранением вязкости материала в промежутках, обеспечивая высокую поверхностную износостойкость при сохранении способности поглощать динамические нагрузки.

Заключение

В результате проведенного исследования обоснована и экспериментально подтверждена эффективность комбинированного метода упрочнения рабочей поверхности металлорежущего инструмента, основанного на последовательном применении лазерной абляции и нанесения дискретного диффузионного покрытия. Установлено, что предварительная лазерная обработка наносекундными импульсами формирует на поверхности микрорельеф и активированный слой, что повышает адгезию последующего покрытия на 30–45% и создает сжимающие остаточные напряжения. Нанесение дискретного оксидного покрытия методом ионно-диффузионного насыщения в активированном воздушном потоке позволяет получить структуру с чередующимися зонами упрочнения, что минимизирует концентрацию напряжений и компенсирует разницу коэффициентов термического расширения основы и покрытия. Синергетический эффект от сочетания данных методов проявляется в формировании градиентного переходного слоя с плавным изменением механических свойств, что обеспечивает комплексное улучшение эксплуатационных характеристик: износостойкость инструмента увеличивается в 2–3 раза, повышается

сопротивление усталостному и хрупкому разрушению при сохранении вязкости основного материала. Разработанная комбинированная технология является перспективной для применения в условиях серийного и массового производства с целью увеличения ресурса режущего инструмента и снижения производственных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев С.Н., Волосова М.А., Боровский В.Г. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя керамического инструмента для повышения его работоспособности при обработке закаленных сталей // Станки и инструмент. – 2005. – № 9. – С. 14–19.
2. Коротаев А.Д., Мошков В.Ю., Овчинников С.В., Пинжин Ю.П., Савостиков В.М., Тюменцев А.Н. Наноструктурные и нанокompозитные сверхтвердые покрытия // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 5. – С. 103–106.
3. Верещака А.С., Верещака А.А., Бубликов Ю.И., Оганян М.Г. Наноразмерные многослойно-композиционные покрытия для повышения износостойкости и работоспособности твердосплавных концевых фрез // Резание и инструменты в технологических системах. – 2014. – Вып. 84. – С. 26–42.
4. Максимов Ю.В., Бубликов Ю.И., Верещака А.А., Верещака А.С., Хаустова О.Ю., Козлов Л.А., Хожаев О.Х. Нанодисперсные многослойно-композиционные покрытия для режущих инструментов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – Т. 2. – № 2(14). – С. 222–229.
5. Чернобай С.П., Саблина Н.С. Совершенствование технологии изготовления режущего инструмента из быстрорежущих сталей для обработки деталей летательных аппаратов // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 8-3. – С. 405–406.
6. Yakubov Ch., Dzhemalyadinov R., Skakun V. Improving material cutting by application of natural origin oil // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 83. – P. 01130. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/83/mateconf_icmtmt2018_01130/mateconf_icmtmt2018_01130.html
7. Агеев Э.И., Быченков В.Ю., Вейко В.П., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Петров А.А., Самохвалов А.А. Двухимпульсная фемтосекундная лазерная абляция поверхности стали с варьлируемой межимпульсной задержкой // Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 104. – Вып. 6. – С. 435–439.
8. Козловский А.Э., Колобов М.Ю. Термическая обработка углеродистых сталей: учебное пособие. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2017. – 144 с.
9. Kazaryan M.A., Lidskii V.V., Sachkov V.I. On one mechanism of light ablation of nanostructures // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2018. – Vol. 10614. – (International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XIII).
10. Grigoryants A.G., Stavertiy A.Y., Bazaleeva K.O., Yudina T.Y., Smirnova N.A., Tretyakov R.S., Misyurov A.I. Laser surfacing of nickel-based composite war-resisting coatings reinforced with tungsten carbide // Welding International. – 2017. – Vol. 31. – No. 1. – P. 52–57.
11. Machining with Long Pulse Lasers, Machining with Ultrafast Laser Pulses. – 2011. – URL: <http://www.cmxr.com/Education/Long.html>
12. Shafeev G.A. Laser Ablation in Flowing Liquid // Laser Ablation in Liquids: Principles and Applications in the Preparation of Nanomaterials / ed. by G. Yang. – 2012. – P. 549–572. – DOI: 10.1201/b11623-12.
13. Hamad A.H. Effects of different laser pulse regimes (nanosecond, picosecond and femtosecond) on the ablation of materials for production of nanoparticles in liquid solution // High Energy and Short Pulse Lasers / ed. by K. Jakubczak. – 2016. – P. 305–325.
14. Barmina E.V., Simakin A.V., Shafeev G.A. Laser Alloying of Co Nanorods and Al Nanoparticles in a Liquid // ChemPhysChem. – 2017. – Vol. 18. – No. 9. – P. 1069–1073.
15. Serkov A.A., Barmina E.V., Simakin A.V., Kuzmin P.G., Voronov V.V., Shafeev G.A. Generation of core-shell nanoparticles Al@Ti by laser ablation in liquid for hydrogen storage // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 348. – P. 71–74.
16. Yan Z., Chrisey D.B. Pulsed laser ablation in liquid for micro-/nanosstructure generation // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. – 2012. – Vol. 13. – No. 3. – P. 204–223. – DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2012.04.004.
17. Kudryashov S.I., Nguyen L.V., Kirilenko D.A., Brunkov P.N., Rudenko A.A., Busleev N., Saraeva I.N., Nastulyavichus A.A., Ionin A.A., Tolordava E.R., et al. Large-scale Laser Fabrication of Anti-Fouling Si Surface Nanosheet Arrays via Nanoplasmonic Ablative Self-organization in Liquid CS₂ Tracked by Sulfur Dopant // ACS Applied Nano Materials. – 2018. – Vol. 1. – No. 5. – P. 2461–2468.
18. Streubel R., Barcikowski S., Gökce B. Continuous multigram nanoparticle synthesis by high-power, high-repetition-rate ultrafast laser ablation in liquids // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41. – No. 7. – P. 1486–1489.
19. Lang V., Rank A., Lasagni A.F. Large Area One-Step Fabrication of Three-Level Multiple-Scaled Micro and Nanostructured Nickel Sleeves for Roll-to-Roll Hot Embossing // Advanced Engineering Materials. – 2017. – Vol. 19. – No. 8. – P. 1700126.
20. Yagyaev E., Akimov S. Modification of the surface of a reconditioned cutting tool via laser ablation // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037. – P. 558–563. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.558.
21. Чекалова Е.А. Поверхностное упрочнение инструментальных и конструкционных материалов нанесением дискретного диффузионного покрытия: дис.... д-ра техн. наук. – М., 2018. – 282 с.
22. Сефедин И.Д., Ягьяев Э.Э., Аметов И.Э. Создание микро- и наноструктур на поверхности металлорежущего инструмента из стали Р6М5 для повышения износостойкости методом лазерной абляции // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2024. – № 3(85). – С. 213–219.
23. Сефедин И.Д., Ягьяев Э.Э. Современные методы повышения износостойкости металлорежущих инструментов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2025. – № 3(89). – С. 331–337.

24. Сефедин И.Д., Ягьяев Э.Э., Аметов И.Э. Создание микро- и наноструктур на поверхности твердого сплава T15K6 для повышения износостойкости методом лазерной абляции // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2024. – № 4(86). – С. 296–301.

25. Чекалова Е.А., Чекалов П.Д., Соломатина Р.Д. Способ формирования износостойкого покрытия на поверхности металлической детали: пат. 2548835 Рос. Федерация: МПК C23C8/36. – № 2014100336/02; заявл. 01.11.2013; опубл. 24.03.2015, Бюл. № 9.

26. Chekalova E.A., Zhuravlev A.V. Increased Material Durability with a Discrete Oxide Layer // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910. – P. 604–609.

Сефедин Исмаил Бей Диливер оглу
ГБОУВО РК КИПУ имени Февзи Якубова, г.
Смферополь
Преподаватель кафедры электромеханики и
сварки
295015, Республика Крым, г. Симферополь, пер.
Учебный, д.8
Телефон: +7(978)0363329
E-mail: sefedin_i@mail.ru

Ягьяев Эльмар Энверович
ГБОУВО РК КИПУ имени Февзи Якубова, г.
Смферополь
Кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой электромеханики и сварки
295015, Республика Крым, г. Симферополь, пер.
Учебный, д.8
Телефон: +7(978)7484071
E-mail: elmar1875@gmail.com

SEFEDIN I.D., YAGYAEV E.E.

IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF METAL-CUTTING TOOLS BASED ON COMPREHENSIVE MODIFICATION OF THEIR WORKING SURFACE

Abstract. *This article presents the development and study of a combined method for increasing the wear resistance of metal-cutting tools, consisting of preliminary laser ablation with nanosecond pulses and subsequent application of a discrete diffusion coating. A scientific hypothesis is substantiated regarding the achievement of a synergistic effect through the formation of an adaptive microstructure with gradient properties. The technological foundations of both processes are described: optimal laser processing modes for P6M5 steel and the conditions for the formation of a discrete oxide layer using an activated ionized air flow are determined. It is shown that laser ablation creates a specific microtexture on the surface, enhancing coating adhesion and forming an intermediate hardened layer. The discrete coating, in turn, ensures effective relaxation of thermal stresses. The combined application of these methods results in the formation of a composite surface system consisting of "base-intermediate layer-coating," which increases tool life by 2-3 times by enhancing wear resistance and maintaining the required ductility of the base.*

Keywords: wear resistance, metal-cutting tool, laser ablation, discrete diffusion coating, combined modification, surface layer.

BIBLIOGRAPHY

1. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Borovsky V.G. Technological Support of the Quality of the Surface Layer of a Ceramic Tool to Enhance Its Performance in Hardened Steel Machining // Machine Tools and Instruments. – 2005. – No. 9. – Pp. 14–19.
2. Korotaev A.D., Moshkov V.Yu., Ovchinnikov S.V., Pinzhin Yu.P., Savostikov V.M., Tyumentsev A.N. Nanostructured and Nanocomposite Superhard Coatings // Physical Mesomechanics. – 2005. – Vol. 8. – No. 5. – Pp. 103–106.
3. Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A., Bublikov Yu.I., Oganyan M.G. Nanoscale multilayer composite coatings for increasing wear resistance and performance of carbide end mills // Cutting and tools in technological systems. – 2014. – Issue. 84. – P. 26–42.
4. Maksimov Yu.V., Bublikov Yu.I., Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S., Khaustova O.Yu., Kozlov L.A., Khozhaev O.Kh. Nanodispersed multilayer composite coatings for cutting tools // Bulletin of Moscow State Technical University "MAMI". – 2012. – Vol. 2. – No. 2(14). – P. 222–229.
5. Chernobay S.P., Sablina N.S. Improvement of the manufacturing technology of cutting tools from high-speed steels for machining aircraft parts // International Journal of Experimental Education. – 2015. – No. 8-3. – pp. 405–406.
6. Yakubov Ch., Dzhemalyadinov R., Skakun V. Improving material cutting by application of natural origin oil // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 83. – P. 01130. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/83/mateconf_icmtmte2018_01130/mateconf_icmtmte2018_01130.html
7. Ageev E.I., Bychenkov V.Yu., Veiko V.P., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Petrov A.A., Samokhvalov A.A. Double-pulse femtosecond laser ablation of a steel surface with variable interpulse delay // JETP Letters. – 2016. – Vol. 104. – Issue 6. – Pp. 435–439.
8. Kozlovsky A.E., Kolobov M.Yu. Heat Treatment of Carbon Steels: A Tutorial. – Ivanovo: Ivan. State Chemical-Technological University, 2017. – 144 p.
9. Kazaryan M.A., Lidskii V.V., Sachkov V.I. On One Mechanism of Light Ablation of Nanostructures // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2018. – Vol. 10614. – (International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XIII).

10. Grigoryants A.G., Stavertiy A.Y., Bazaleeva K.O., Yudina T.Y., Smirnova N.A., Tretyakov R.S., Misyurov A.I. Laser surfacing of nickel-based composite war-resisting coatings reinforced with tungsten carbide // *Welding International*. – 2017. – Vol. 31. – No. 1. – P. 52-57.
11. Machining with Long Pulse Lasers, Machining with Ultrafast Laser Pulses. – 2011. – URL: <http://www.cmxr.com/Education/Long.html>
12. Shafeev G.A. Laser Ablation in Flowing Liquid // *Laser Ablation in Liquids: Principles and Applications in the Preparation of Nanomaterials* / ed. by G. Yang. – 2012. – P. 549-572. – DOI: 10.1201/b11623-12.
13. Hamad A.H. Effects of different laser pulse regimes (nanosecond, picosecond and femtosecond) on the ablation of materials for production of nanoparticles in liquid solution // *High Energy and Short Pulse Lasers* / ed. by K. Jakubczak. – 2016. – P. 305–325.
14. Barmina E.V., Simakin A.V., Shafeev G.A. Laser Alloying of Co Nanorods and Al Nanoparticles in a Liquid // *ChemPhysChem*. – 2017. – Vol. 18. – No. 9. – P. 1069–1073.
15. Serkov A.A., Barmina E.V., Simakin A.V., Kuzmin P.G., Voronov V.V., Shafeev G.A. Generation of core-shell nanoparticles Al@Ti by laser ablation in liquid for hydrogen storage // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 348. – P. 71–74.
16. Yan Z., Chrisey D.B. Pulsed laser ablation in liquid for micro-/nanostructure generation // *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. – 2012. – Vol. 13. – No. 3. – P. 204–223. – DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2012.04.004.
17. Kudryashov S.I., Nguyen L.V., Kirilenko D.A., Brunkov P.N., Rudenko A.A., Busleev N., Saraeva I.N., Nastulyavichus A.A., Ionin A.A., Tolordava E.R., et al. Large-scale Laser Fabrication of Anti-Fouling Si Surface Nanosheet Arrays via Nanoplasmonic Ablative Self-organization in Liquid CS₂ Tracked by Sulfur Dopant // *ACS Applied Nano Materials*. – 2018. – Vol. 1. – No. 5. – P. 2461–2468.
18. Streubel R., Barcikowski S., Gökce B. Continuous multigram nanoparticle synthesis by high-power, high-repetition-rate ultrafast laser ablation in liquids // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41. – No. 7. – P. 1486–1489.
19. Lang V., Rank A., Lasagni A.F. Large Area One-Step Fabrication of Three-Level Multiple-Scaled Micro and Nanostructured Nickel Sleeves for Roll-to-Roll Hot Embossing // *Advanced Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 19. – No. 8. – P. 1700126.
20. Yagyaev E., Akimov S. Modification of the surface of a reconditioned cutting tool via laser ablation // *Materials Science Forum*. – 2021. – Vol. 1037. – P. 558-563. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.558.
21. Chekalova E.A. Surface hardening of tool and structural materials by applying a discrete diffusion coating: dis.... Doctor of Engineering Sciences. - Moscow, 2018. - 282 p.
22. Sefedin I.D., Yagyaev E.E., Ametov I.E. Creation of micro- and nanostructures on the surface of a metal-cutting tool made of P6M5 steel to increase wear resistance by laser ablation // *Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*. - 2024. - No. 3 (85). - P. 213-219.
23. Sefedin I.D., Yagyaev E.E. Modern methods of increasing the wear resistance of metal-cutting tools // *Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*. - 2025. - No. 3 (89). – P. 331–337.
24. Sefedin I.D., Yagyaev E.E., Ametov I.E. Creation of micro- and nanostructures on the surface of T15K6 hard alloy to increase wear resistance by laser ablation // *Scientific notes of the Crimean engineering and pedagogical university*. – 2024. – No. 4(86). – P. 296–301.
25. Chekalova E.A., Chekalov P.D., Solomatina R.D. Method for forming a wear-resistant coating on the surface of a metal part: patent. 2548835 Russian Federation: IPC C23C8/36. – No. 2014100336/02; declared. 01.11.2013; published. 24.03.2015, Bull. No. 9.
26. Chekalova E.A., Zhuravlev A.V. Increased Material Durability with a Discrete Oxide Layer // *Key Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 910. – P. 604–609.

Sefedin Ismail Bey Dilyaver oglu

SBEIHE RC CEPU named after Fevzi Yakubov,
Simferopol
Lecturer, Department of Electromechanics and
Welding
295015, Republic of Crimea, Simferopol, Uchebny
Lane, Building 8
Phone: +7 (978) 0363329
E-mail: sefedin_i@mail.ru

Yagyaev Elmar Enverovich

SBEIHE RC CEPU named after Fevzi Yakubov,
Simferopol
PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the
Electromechanics and Welding Department
295015, Republic of Crimea, Simferopol, Uchebny
Lane, Building 8
Phone: +7 (978) 7484071
E-mail: elmar1875@gmail.com

© Сефедин И.Д., Ягъяев Э.Э., 2026

ПЕРЕВАЙ Т.А., МУХИНА О.В., ТАРАХОВСКИЙ А.Ю.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОТВЕРДОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ДОЗВУКОВОЙ И СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ

Аннотация. В данной работе представлены результаты сравнительных исследований микротвердости защитных покрытий, нанесенных на порошковую сталь методами газопорошковой (ГПН) и сверхзвуковой газопорошковой (СГПН) наплавки. Проведены замеры микротвердости в основном металле, на границе сплавления и в наплавленном слое для образцов с различной толщиной покрытия (1,0-1,2 мм и 1,5-1,7 мм). Установлено, что оба метода значительно повышают твердость поверхности по сравнению с основным материалом, однако демонстрируют различный характер распределения твердости по сечению покрытия. Метод СГПН позволяет добиться более однородной структуры покрытия с меньшими колебаниями значений микротвердости, что связывается с равномерным распределением упрочняющих карбидных фаз в никелевой матрице.

Ключевые слова: микротвердость, защитные покрытия, газопорошковая наплавка (ГПН), сверхзвуковая газопорошковая наплавка (СГПН), граница сплавления, карбидные фазы.

Введение

Повышение износостойкости и продление срока службы ответственных деталей машин является одной из ключевых задач современного машиностроения. Традиционные методы упрочнения часто не обеспечивают необходимого уровня эксплуатационных характеристик. Эффективной альтернативой им являются методы газопорошковой наплавки, позволяющие создавать на поверхности деталей плотные защитные покрытия с высокими механическими свойствами.

Данное исследование продолжает цикл работ [1,2], посвященных изучению структуры и свойств покрытий, реализованное на сравнительном анализе микротвердости слоев, полученных двумя методами: классической дозвуковой газопорошковой наплавкой (ГПН) и сверхзвуковой газопорошковой наплавкой (СГПН). Дозвуковая газопорошковая наплавка (ГПН) является классическим и широко распространенным методом. В этом процессе порошок присадочного материала подается в пламя газовой горелки, где он нагревается и плавится, а затем осаждается на поверхность детали. Скорость частиц порошка в этом случае не превышает скорость звука. Этот метод отличается относительной простотой оборудования, доступностью и возможностью нанесения широкого спектра материалов. Сверхзвуковая газопорошковая наплавка (СГПН) представляет собой более современный подход. В этом процессе порошок также подается в пламя, но затем поток частиц ускоряется до сверхзвуковых скоростей с помощью специального сопла. Высокая кинетическая энергия частиц приводит к их интенсивному удару о поверхность детали, что способствует формированию плотного и мелкозернистого покрытия с улучшенными механическими свойствами.

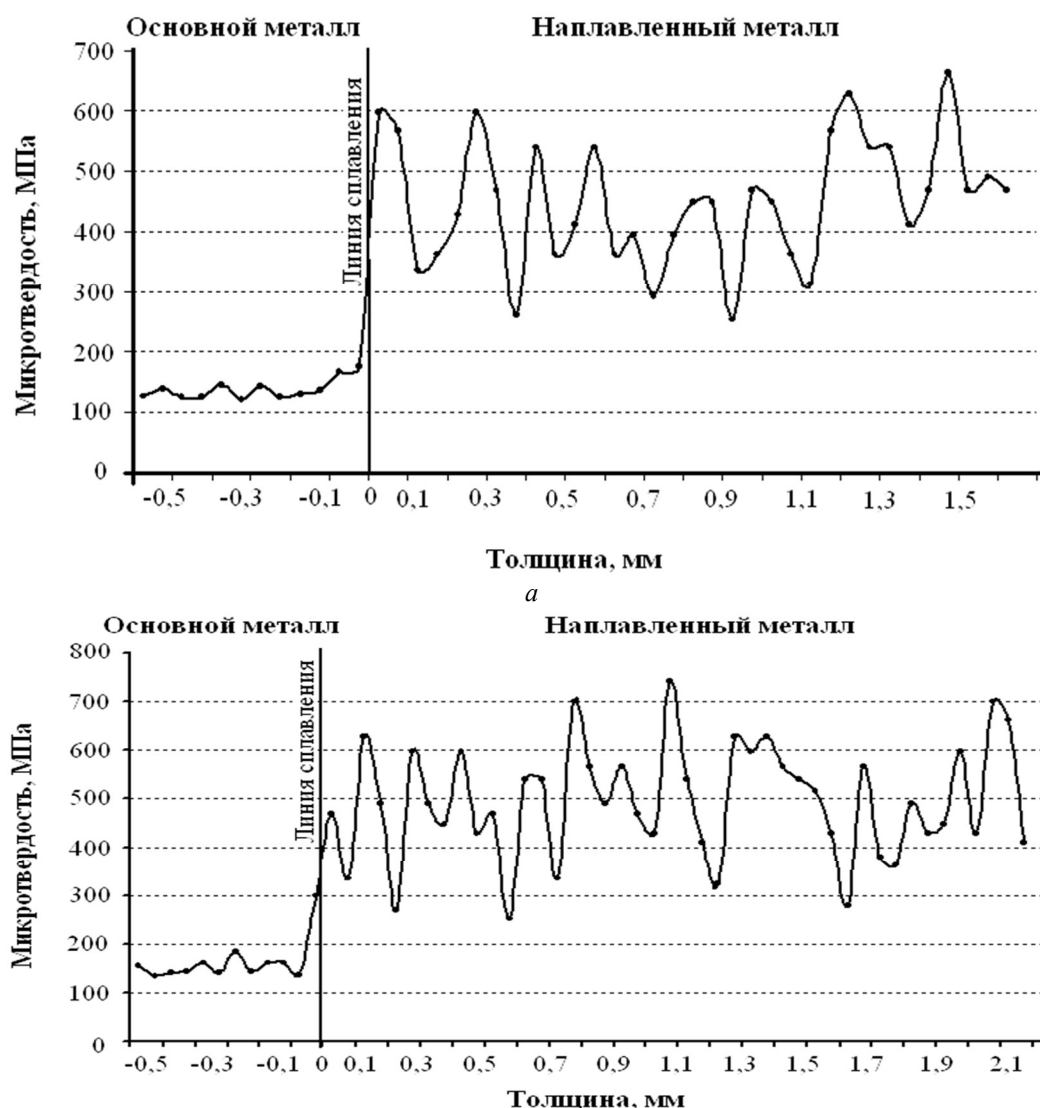
Цель работы – оценить влияние технологии нанесения и толщины покрытия на распределение микротвердости и, как следствие, на потенциальную износостойкость упрочненного материала.

Основная часть

В современном машиностроении и других отраслях промышленности защитные покрытия играют ключевую роль в обеспечении долговечности и надежности деталей, подверженных интенсивному износу, коррозии и высокотемпературному воздействию. Разработка и применение эффективных методов нанесения таких покрытий является актуальной научно-технической задачей. Среди широкого спектра технологий газотермического напыления особое место занимает газопорошковая наплавка (ГПН), благодаря своей универсальности, относительной простоте и возможности нанесения покрытий с различными физико-механическими свойствами.

Одним из важнейших параметров, определяющих эксплуатационные характеристики защитных покрытий, является их микротвердость. Этот параметр отражает сопротивление материала локальному пластическому деформированию под воздействием индентора и косвенно характеризует его износостойкость, сопротивление усталостному разрушению и другие важные свойства. Микротвердость покрытий, нанесенных методом ГПН, существенно зависит от режима напыления, свойств используемого порошкового материала и режимов последующей термической обработки [3].

В настоящее время широкое распространение получили как дозвуковые, так и сверхзвуковые технологии ГПН. Дозвуковая ГПН характеризуется относительно низкой температурой и скоростью частиц, что может приводить к большей пористости и меньшей адгезии покрытия. Сверхзвуковая ГПН, напротив, обеспечивает более высокую плотность и прочное сцепление покрытия с подложкой, но может вызывать нежелательные структурные изменения в материале [4].



б

Рисунок 1 - Графики распределения микротвердости в основном металле и защитном слое образцов, полученных методом ГПН (высота защитного покрытия: а - $h = 1,0-1,2$, б - $h = 1,5-1,7$)

В связи с этим, проведение сравнительного анализа микротвердости защитных покрытий, полученных методами дозвуковой и сверхзвуковой ГПН, представляет значительный научный и практический интерес. Данное исследование позволит выявить преимущества и недостатки каждого метода, а также разработать рекомендации по

оптимизации параметров напыления для получения покрытий с заданными эксплуатационными характеристиками.

Основой для исследований служили образцы из порошковой стали (0,45% С), полученной методом электроконтактного уплотнения [5,6]. На их поверхность методом ГПН и СГПН наносилось защитное покрытие на основе никелевого сплава с карбидообразующими элементами.

Были подготовлены две серии образцов с разной толщиной наплавленного слоя [7]:

Серия 1: высота покрытия $h = 1,0\text{--}1,2$ мм;

Серия 2: высота покрытия $h = 1,5\text{--}1,7$ мм.

Измерения микротвердости проводились на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 50 г. Микротвердость является одним из важнейших параметров, характеризующих износостойкость и долговечность защитного покрытия. Она отражает сопротивление материала пластической деформации под действием малых нагрузок. Высокая микротвердость, как правило, коррелирует с повышенной стойкостью к абразивному износу, царапанию и другим видам механического воздействия. Замеры выполнялись по всему сечению: в основном металле, на границе сплавления и в наплавленном покрытии с фиксацией отпечатков индентора [8,9].

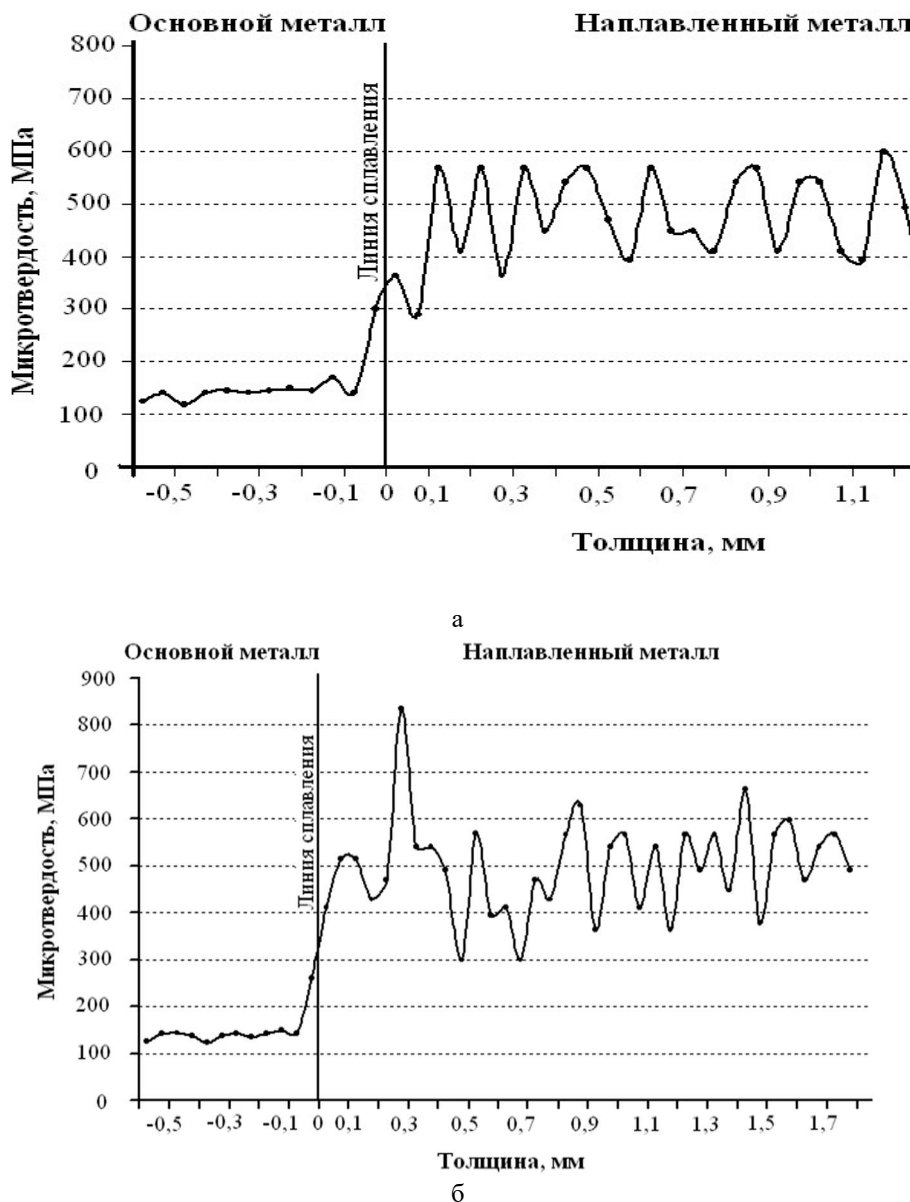


Рисунок 2 - Графики распределения микротвердости в основном металле и защитном слое образцов, полученных методом СГПН (высота защитного покрытия: а - $h = 1,0\text{--}1,2$, б - $h = 1,5\text{--}1,7$)

Микротвердость покрытий, полученных методом ГПН

Анализ графиков распределения микротвердости (Рисунок 1) показал, что для покрытий, нанесенных методом ГПН, характерно неравномерное распределение значений с значительной амплитудой колебаний. Максимальные значения микротвердости соответствуют твердым карбидным фазам (Fe_3C , Cr_3C_2 , Cr_7C_3), а минимальные – более пластичной никелевой матрице.

Наблюдается резкий рост твердости непосредственно от границы сплавления. Твердость наплавленного покрытия в среднем на 150–250 МПа превышает твердость основного металла.

2. Микротвердость покрытий, полученных методом СГПН (Рисунок 2).

Покрытия, сформированные методом СГПН, продемонстрировали качественно иной результат:

Для серии 1 с $h = 1,0\text{--}1,2$ мм микротвердость защитного покрытия в 5 раз, а на линии сплавления – в 2 раза превысила микротвердость основного металла. Распределение значений оказалось более равномерным.

Для серии 2 с $h = 1,5\text{--}1,7$ мм микротвердость покрытия была выше в 3 раза, а на границе сплавления – в 8 раз. Наблюдался резкий скачок твердости у границы сплавления с последующим плавным снижением при увеличении толщины слоя.

Ключевым отличием является меньшая амплитуда колебаний значений микротвердости [10], что свидетельствует о большей однородности структуры покрытия, полученного СГПН-методом (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов

Сравнительная характеристика методов		
Параметр	ГПН	СГПН
Равномерность распределения	Неравномерное, большие колебания	Более равномерное, малые колебания
Коэффициент упрочнения (покрытие/основа)	1,2-1,5	3 – 5
Микротвердость на границе	Плавный рост	Резкий скачок (увеличение в 2-8 раз)
Влияние толщины покрытия	Явной тенденции не выявлено	Четкая зависимость; оптимум при 0,1-0,2 мм и 1,2-1,4 мм

Превосходство СГПН объясняется более совершенной технологией нанесения. Сверхзвуковой поток газа обеспечивает лучшее смешение и расплавление порошка, а также более равномерное распределение упрочняющих карбидных фаз (Fe_3C , Cr_3C_2 , Cr_7C_3) по всему объему никелевой аустенитной матрицы.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Оба метода наплавки (ГПН и СГПН) эффективно повышают твердость поверхности и, как следствие, ее износостойкость.

2. Метод сверхзвуковой газопорошковой наплавки (СГПН) является более предпочтительным, так как позволяет получать покрытия с более однородной структурой и значительно более высокой микротвердостью (в 3-5 раз выше, чем у основного металла).

3. Микротвердость наплавленного покрытия варьируется в диапазоне 500–800 МПа для СГПН, с максимумом в зонах концентрации карбидных фаз.

4. Для достижения оптимальных механических свойств покрытия, полученного методом СГПН, необходимо строго контролировать его толщину и технологические параметры процесса наплавки (температуру, время, расстояние), чтобы избежать растворения карбидов или образования пор.

Таким образом, использование сверхзвуковой газопорошковой наплавки является высокоэффективным методом для создания износостойких защитных покрытий и значительно превосходит по своим характеристикам традиционную дозвуковую технологию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перевай, Т. А. Исследование характеристик микротвердости наплавленного слоя, сформированного методом сверхзвуковой газопорошковой технологии / Т. А. Перевай // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 3(123). – С. 890-897.
2. Перевай, Т. А. Измерение микротвердости по сечению наплавленного слоя методом газопорошковой наплавки / Т. А. Перевай // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 11(95). – С. 748-754.
3. Определение карбидной составляющей защитных покрытий, выполненных дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавкой / Т. А. Литвинова, Л. В. Постой, А. А. Мецлер, Д. В. Могилевский // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2-2(36). – С. 5.
4. Радченко, М. В. Практическое использование технологии сверхзвуковой газопорошковой наплавки износостойких покрытий / М. В. Радченко, В. С. Киселев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2022. – № 6(154). – С. 7-13. – DOI 10.26730/1999-4125-2022-6-7-13.
5. Litvinova, T. A. Dependence of the Strength of Powder Steel Formed by Electro-Contact Compaction on Iron Powder Preparation Method / T. A. Litvinova, S. N. Egorov // Metallurgist. – 2018. – Vol. 61, No. 11-12. – P. 977-981. – DOI 10.1007/s11015-018-0595-0.
6. Litvinova, T. A. Effect of Iron Powder Preparation Method on Powder Steel Compact Formation During Electric-Contact Compaction / T. A. Litvinova, S. N. Egorov // Metallurgist. – 2015. – Vol. 59, No. 3-4. – P. 236-240. – DOI 10.1007/s11015-015-0090-9.
7. Определение карбидной составляющей защитных покрытий, выполненных дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавкой / Т. А. Литвинова, Л. В. Постой, А. А. Мецлер, Д. В. Могилевский // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2-2(36). – С. 5.
8. Литвинова, Т. А. Исследование износостойкости покрытий, полученные методами газопорошковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавки / Т. А. Литвинова, А. А. Мецлер, Р. В. Пирожков // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 1(18). – С. 46-50.
9. Радченко, М. В. Комплексный анализ структуры и распределения микротвердости покрытий, наплавленных способом сверхзвуковой газопорошковой наплавки / М. В. Радченко, Е. А. Ледников, В. С. Киселев // Структура. Контроль. Диагностика. Ресурс: Сборник научных трудов, посвященный 75-летию доктора технических наук, профессора А.Н. Смирнова / Под общей редакцией Н.В. Абабкова. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 158-169.
10. Радченко, М. В. Применение технологии сверхзвуковой газопорошковой наплавки износостойких покрытий для борьбы с кавитационным износом / М. В. Радченко, В. С. Киселев // Уральский форум сварки и контроля – 2023: Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 135-летию изобретения Н.Г. Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом, Пермь, 20–21 апреля 2023 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2023. – С. 120-124.

Перевай Татьяна Анатольевна
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», г.
Севастополь
Кандидат технических наук, доцент
кафедры
«Цифровое проектирование»
299053, г. Севастополь,
ул. Университетская, д.33
E-mail: talitvinova@mail.sevsu.ru

Мухина Оксана Викторовна
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», г.
Севастополь
Кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры
«Цифровое проектирование»
299053, г. Севастополь,
ул. Университетская, д.33
E-mail: ovmyhina@mail.sevsu.ru

Тараховский Алексей Юрьевич
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», г.
Севастополь
Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
«Цифровое проектирование»
299053, г. Севастополь,
ул. Университетская, д.33
E-mail: aytarakhovskiy@mail.sevsu.ru

PEREVAY T.A., MUKHINA O.V., TARAKHOVSKY A.Yu.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MICROHARDNESS OF PROTECTIVE COATINGS OBTAINED BY SUBSONIC AND SUPERSONIC GAS-POWDER SURFACE-BUILDING METHODS

Abstract. In this work, the results of comparative studies of the microhardness of protective coatings applied to powder steel by gas-powder (GP) and supersonic gas-powder (SP) surfacing are presented. Microhardness measurements were performed in the base metal, at the fusion boundary, and in the deposited layer for samples with different coating thicknesses (1.0-1.2 mm and 1.5-1.7 mm). It was found that both methods significantly increase the surface hardness compared to the base material, but they exhibit different patterns of hardness distribution across the

coating thickness. The SGPN method allows for a more uniform coating structure with less variation in microhardness values and a multiple (3-5 times) increase in microhardness, which is attributed to the uniform distribution of strengthening carbide phases in the nickel matrix.

Keywords: microhardness, protective coatings, gas-powder surfacing (GPS), supersonic gas-powder surfacing (SSPS), fusion boundary, and carbide phases.

BIBLIOGRAPHY

1. Perevaj, T. A. Issledovanie harakteristik mikrotverdosti naplavlennogo sloya, sformirovannogo metodom sverhzhukovoj gazoporoshkovoj tekhnologii / T. A. Perevaj // Inzhenernyj vestnik Dona. – 2025. – № 3(123). – S. 890-897.
2. Perevaj, T. A. Izmerenie mikrotverdosti po secheniyu naplavlennogo sloya metodom gazoporoshkovoj naplavki / T. A. Perevaj // Inzhenernyj vestnik Dona. – 2022. – № 11(95). – S. 748-754.
3. Opredelenie karbidnoj sostavlyayushchej zashchitnyh pokrytij, vypolnennyh dozvukovoj i sverhzhukovoj gazoporoshkovoj naplavkoj / T. A. Litvinova, L. V. Postoj, A. A. Mecler, D. V. Mogilevskij // Inzhenernyj vestnik Dona. – 2015. – № 2-2(36). – S. 5.
4. Radchenko, M. V. Prakticheskoe ispolzovanie tekhnologii sverhzhukovoj gazoporoshkovoj naplavki iznosostojkih pokrytij / M. V. Radchenko, V. S. Kiselev // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 6(154). – S. 7-13. – DOI 10.26730/1999-4125-2022-6-7-13.
5. Litvinova, T. A. Dependence of the Strength of Powder Steel Formed by Electro-Contact Compaction on Iron Powder Preparation Method / T. A. Litvinova, S. N. Egorov // Metallurgist. – 2018. – Vol. 61, No. 11-12. – P. 977-981. – DOI 10.1007/s11015-018-0595-0.
6. Litvinova, T. A. Effect of Iron Powder Preparation Method on Powder Steel Compact Formation During Electric-Contact Compaction / T. A. Litvinova, S. N. Egorov // Metallurgist. – 2015. – Vol. 59, No. 3-4. – P. 236-240. – DOI 10.1007/s11015-015-0090-9.
7. Opredelenie karbidnoj sostavlyayushchej zashchitnyh pokrytij, vypolnennyh dozvukovoj i sverhzhukovoj gazoporoshkovoj naplavkoj / T. A. Litvinova, L. V. Postoj, A. A. Mecler, D. V. Mogilevskij // Inzhenernyj vestnik Dona. – 2015. – № 2-2(36). – S. 5.
8. Litvinova, T. A. Issledovanie iznosostojkosti pokrytij, poluchennye metodami gazoporoshkovoj i sverhzhukovoj gazoporoshkovoj naplavki / T. A. Litvinova, A. A. Mecler, R. V. Pirozhkov // Globalnaya yadernaya bezopasnost. – 2016. – № 1(18). – S. 46-50.
9. Radchenko, M. V. Kompleksnyj analiz struktury i raspredeleniya mikrotverdosti pokrytij, naplavlennyh sposobom sverhzhukovoj gazoporoshkovoj naplavki / M. V. Radchenko, E. A. Lednikov, V. S. Kiselev // Struktura. Kontrol. Diagnostika. Resurs: Sbornik nauchnyh trudov, posvyashchennyj 75-letiyu doktora tekhnicheskikh nauk, professora A.N. Smirnova / Pod obshchej redakciej N.V. Ababkova. – Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2022. – S. 158-169.
10. Radchenko, M. V. Primenenie tekhnologii sverhzhukovoj gazoporoshkovoj naplavki iznosostojkih pokrytij dlya borby s kavitacionnym iznosom / M. V. Radchenko, V. S. Kiselev // Uralskij forum svarki i kontrolya – 2023: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 135-letiyu izobreteniya N.G. Slavyanovym elektrodugovoj svarki plavyashchimsya elektrodom, Perm, 20–21 aprelya 2023 goda. – Perm: Permskij nacionalnyj issledovatel'skij politekhnicheskij universitet, 2023. – S. 120-124.

Perevaj Tatiana Anatolyevna
FSAOU HE «Sevastopol State University», Sevastopol
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor Department of
«Digital Design»
299053, Sevastopol, Universitetskaya
str., h.33
E-mail: talitvinova@mail.sevsu.ru

Mukhina Oksana Viktorovna
FSAOU HE «Sevastopol State University», Sevastopol
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Associate
Professor of «Digital Design»
299053, Sevastopol, Universitetskaya
str., h.33
E-mail: ovmyhina@mail.sevsu.ru

Tarakhovsky Alexey Yurievich
FSAOU HE «Sevastopol State University», Sevastopol
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Head of the
Department of «Digital Design»
299053, Sevastopol, Universitetskaya
str., h.33
E-mail: aytarakhovskiy@mail.sevsu.ru

© Перевай Т.А., Мухина О.В., Тараховский А.Ю., 2026

НЕМЕНКО А.В., НИКИТИН М.М.

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Аннотация. Предложен метод управления технологическим процессом финишной обработки криволинейной поверхности по удержанию интегрального отклонения параметров обрабатываемой поверхности в заданных пределах. Для прогноза асимптотического значения производится оценка интегрального отклонения в разные моменты времени и составляется аналоговая функция времени, проходящая через измеренную последовательность оценок. Полученная функция затем разлагается в ряды по положительным и отрицательным степеням времени, коэффициенты которых взаимно связаны. В результате, асимптотическое значение интегральной ошибки находится как свободный член ряда по отрицательным степеням времени или же, как линейная комбинация всех коэффициентов ряда по положительным степеням. В целях управления полученная линейная комбинация записывается в функции настраиваемых параметров технологического процесса, таких как среднее технологическое усилие или средняя скорость обработки. В случае выхода прогнозного значения интегральной ошибки за границы допустимого диапазона формируется корректирующее воздействие, при котором параметрам придаются значения, возвращающие новый прогноз в допустимый диапазон. Предложенный алгоритм является непараметрическим относительно класса обрабатываемой поверхности и использует достаточно общие закономерности, применимые к финишной обработке широкого класса изделий.

Ключевые слова: криволинейная поверхность, асферическая поверхность, финишная обработка, управление качеством, дальний прогноз, выход годных.

Введение

Криволинейные поверхности общего вида находят широкое применение в современном машиностроении.

Вместе с тем снижение трудоемкости изготовления деталей с ними продолжает оставаться актуальной технологической проблемой.

Снижение допусков на геометрию получаемой поверхности и повышение требований к её чистоте вызывают значительное увеличение времени изготовления одной детали и снижают вероятность успешного исхода обработки, приводя в отдельных случаях к задачам, решаемым технологически с практически ничтожной вероятностью [1].

При функционировании технологической линии возникает задача поддержания качества выпускаемых изделий. При этом, как правило, реализуется обратная связь по линии «изготовленная деталь – управляющее воздействие на следующую» [2].

Другим подходом является управление траекторией изготовления фиксированной детали с коррекцией режима обработки по результатам измерений [3], [4]. В ряде случаев такой подход является единственно возможным при изготовлении деталей с заданными ограничениями, кроме того, целесообразность его возрастает с ростом размеров обрабатываемой поверхности и повышением допусков на её геометрию и шероховатость.

Дальнейшему его распространению препятствуют затраты производственного времени на контроль изделий и неочевидность алгоритмов коррекции в случае поверхностей общего вида [5].

Если первая из этих проблем решается в настоящее время распространением готовых схемотехнических решений, то вторая оказывается завязанной на фиксированный технологический процесс и поиск общих закономерностей в ней продолжает сохранять актуальность [6].

В работе [7] рассмотрено управление технологическим процессом получения центральной поверхности второго порядка, оценки качества изделий, получаемых по этому алгоритму, получены в работе [8].

В настоящей работе рассмотрим задачу управления обработкой криволинейной поверхности более общего вида.

Задачу в общем виде сформулируем как удержание прогнозного значения количественного показателя отклонения поверхности от заданной формы, полученного на каждом шаге процесса, в установленном диапазоне значений.

Цель работы:

Для единичного технологического процесса обработки криволинейной поверхности получить оценку допустимости режима обработки исходя из промежуточных замеров отклонения поверхности от геометрически заданной и выработать управляющее воздействие по настраиваемым параметрам технологического процесса.

Материал исследования:

Считаем, что на выходе технологической линии должны быть получены изделия с установленными уровнями геометрии и шероховатости получаемой поверхности.

На входе проводится предварительный контроль заготовок на наличие недопустимых дефектов.

Рассмотрим задачу управления, включающую контроль режима по отклонению получаемой поверхности от заданной и, в случае необходимости, формирование управляющего воздействия по параметрам технологического процесса.

В качестве меры интегрального отклонения поверхности от геометрически заданной формы рассмотрим следующее выражение

$$\delta(D) = \sum_{k=0}^m \iint_D (h_p(x, y) - h_\phi(x, y))^2 dx dy, \quad (1)$$

где h_p – заданное расстояние точки поверхности с координатами (x, y) от базовой плоскости, h_ϕ – фактическое расстояние точки поверхности с теми же координатами от той же плоскости, D – область на базовой плоскости, соответствующая проекции обрабатываемой поверхности.

Таким образом, меру интегрального отклонения, взятую в фиксированный момент времени, представим как функцию измерений в точках, геометрическим местом которых будет область D .

Пусть измерения и расчет по ним меры интегрального отклонения по формуле (1) проводятся в моменты времени

$$t = \{t_1, \dots, t_n\}. \quad (2)$$

Рассмотрим меру отклонений (1), взятую в разные моменты времени, как функцию не только отклонений в точках области D , но и времени (2)

$$\delta = \delta(D, t), \quad (3)$$

где с той или иной степенью достоверности известны значения, соответствующие дискретным моментам, образовавшим последовательность (2).

В целях управления процессом будем на каждом следующем шаге, начиная с n , опираться на то значение функции (3), которое будет соответствовать неограниченно удаленному моменту времени. Обозначим это значение через A и будем искать его в следующей предельной форме

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} \delta(D, t). \quad (4)$$

Отметим, что из теории функций вещественной переменной известно, что данная задача не определена без дополнительных ограничений, накладываемых на функцию $\delta(D, t)$.

Примем следующее: функция $\delta(D, t)$ определена, ограничена и монотонно убывает на полубесконечном интервале, содержащем начало координат. Кроме того, в каждой точке интервала у функции существуют производные по времени всех порядков.

Из этих допущений следует существование разложения функции $\delta(D, t)$ в ряд

$$\delta(D, t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n(D) \cdot t^n. \quad (5)$$

Коэффициенты ряда (5) определяются через производные $\delta(D, t)$ соответствующих порядков:

$$c_n(D) = \frac{1}{n!} \cdot \left. \frac{d^n \delta(D, t)}{dt^n} \right|_{t=0}. \quad (6)$$

В работе [9] было получено, что в ряде случаев предел (4) может быть выражен через коэффициенты ряда (5)

$$A = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(c_0(D) + m \cdot c_1(D) + \frac{m(m-1)}{2} \cdot c_2(D) + \dots + \frac{m(m-1)(m-2) \cdot \dots \cdot (m-k+1)}{k!} \cdot c_n(D) + \dots \right. \\ \left. \dots + c_n(D) \right) \quad (7)$$

Здесь m – произвольное достаточно большое целое число, k – целое число, проходящее диапазон $(0, \dots, m)$. Теория утверждает, что зависимость результата от m будет тем меньшей, чем больше m .

Считаем, что коэффициенты ряда (6) тем или иным способом определены. Практически их можно определить с помощью известных алгоритмов, взяв за основу последовательность (3).

Условие испорченной заготовки после обработки сформулируем как

$$A > \delta_{\max}, \quad (8)$$

где $\delta_{\max}$, – верхняя граница допустимых значений меры интегрального отклонения (1).

Условие допустимости режима и отсутствия необходимости коррекции представим в виде

$$A \in (0, \delta_{\max}). \quad (9)$$

Наоборот, если условие не выполняется, то режим обработки следует изменить.

Для того, чтобы определить, как именно следует изменить режим обработки, должен быть задан набор варьируемых параметров. Рассмотрим его в виде пары «давление – скорость инструмента».

Запишем уравнение линейной регрессии меры интегрального отклонения (1) к параметрам из данной пары

$$\delta(D, t) = a + b \cdot p + c \cdot v, \quad (10)$$

где p – давление обработки, v – скорость инструмента, a, b, c – коэффициенты регрессии, которые, в частности, могут быть получены методом, описываемым в работе [10].

Из структуры формулы (7) следует необходимость вычисления большого количества коэффициентов ряда (5), выражаемых, согласно (6), через производные функции $\delta(D, t)$, а те, в свою очередь, выражаются через конечные разности последовательности (3). При непосредственном использовании этой схемы возникает дополнительная ошибка преобразования.

Для её уменьшения используем некоторые следствия из структуры формулы (7), следующие из теории комплексного переменного.

Пусть равноотстоящим значениям моментов времени, образующих последовательность (2), соответствуют неравноотстоящие значения переменной z для функции, определяемой соотношением

$$z = \frac{t}{1-t} \quad (11)$$

Определим вспомогательную функцию

$$u(z) = \delta(D, t). \quad (12)$$

Тогда

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \delta(D, t) = \lim_{z \rightarrow 1} u(z). \quad (13)$$

Разделим диапазон изменения переменной в функции (12) вдоль отрезка $(0, 1)$ действительной оси на s частей.

Выберем значение s из известного диапазона, дающего минимум ошибки полиномиальной аппроксимации для монотонных функций, $s = 4, \dots, 8$.

Выберем масштабирующий множитель α по оси времени и точки разбивки $\delta(t)$ таким образом, чтобы в исходной последовательности (1) момент времени, соответствующий δ_k , соответствовал бы

$$z = \frac{s-1}{s}. \quad (14)$$

Тогда величина масштабирующего множителя составит

$$\alpha = \frac{s-1}{t_k}. \quad (15)$$

Следующим шагом будет нахождение моментов времени для последовательности (2), в которые должны быть известны значения меры интегрального отклонения. Так как этим моментам будут соответствовать значения z , равные

$$z_n = \frac{n}{s}, \quad (16)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots, s-1$, то, учитывая зависимость (11), справедливым будет соотношение

$$\alpha \cdot t_n = \frac{z_n}{1 - z_n}, \quad (17)$$

Тогда искомые моменты времени получим в виде

$$t_n = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{n}{s-n}. \quad (18)$$

Эти значения, с возможно большей точностью, следует определить интерполяцией между вычисленными значениями последовательности (3).

Тогда искомое асимптотическое значение (7) определится экстраполяцией на один шаг вперед функции, проходящей через точки $\{\delta_n, n/s\}$ и её соответствующих производных. Для этого могут применяться экстраполирующие полиномы. Используя методику сведения полиномиальной экстраполяции на один шаг к процессу скользящего среднего, предложенную в работе [9], получим расчетную формулу

$$A \approx (-1)^{s-1} \cdot \left(\delta(D, t_1) - s \cdot \delta(D, t_2) + \frac{s(s-1)}{2} \delta(D, t_3) + \dots + (-1)^s \cdot s \cdot \delta(D, t_s) \right). \quad (19)$$

Формула (19), в отличие от формулы (7), содержит малое число слагаемых и не содержит конечных разностей. Поэтому возьмем её за основу для формирования управляющего воздействия.

Учитывая (10) и (19), получим формулу, выражающую результат через контролируемые параметры

$$A \approx (-1)^{s-1} \cdot \left(\delta(D, a + b \cdot p_1 + c \cdot v_1) - s \cdot \delta(D, a + b \cdot p_2 + c \cdot v_2) + \frac{s(s-1)}{2} \delta(a + b \cdot p_3 + c \cdot v_3) + \dots \right. \\ \left. (-1)^s \cdot s \cdot \delta(D, a + b \cdot p_s + c \cdot v_s) \right) \quad (20)$$

Формула (20) позволяет, находясь в моменте времени t_n , подобрать последовательности $\{p\}$ и $\{v\}$ в прошлом так, чтобы значение (20) пришло бы в диапазон (9). Кроме того, эти значения могут быть выбраны минимизирующими сумму (20) находясь в пределах выбранной системы ограничений.

Далее устанавливаются разности между подобранными и фактически реализованными парами значений. Полученный массив отклонений и формирует управляющее воздействие на следующем шаге. Затем процесс повторяется.

Таким образом, процесс управления будет заключаться в следующем.

В начальный момент времени параметры технологического процесса (давление и скорость инструмента) задаются как ожидаемые значения вне зависимости от свойств заготовки.

Затем проводится несколько сеансов последовательной обработки, по завершении каждого из которых снимается профиль обрабатываемой поверхности по системе контрольных точек и рассчитывается интегральное отклонение (1).

Затем, на основании формулы (4), проводится оценка допустимости режима обработки с помощью дальнего прогноза.

При несоответствии результатов решается оптимизационная задача на основе формулы (20), в которой требуется подобрать такие значения давления и скорости, чтобы процесс изменения показателя интегральной ошибки (1) сходил к значению из предустановленного диапазона (9)

Выводы.

В настоящей работе предложена методика управления финишной обработкой деталей с криволинейными поверхностями по прогнозируемому значению интегральной ошибки отклонения от расчетных параметров. Рассмотрены вопросы получения асимптотических оценок по конечному временному ряду (последовательности) измеренных оценок интегрального квадратического отклонения поверхности.

Предложен непараметрический относительно класса поверхности метод управления технологическим процессом по асимптотическому поведению интегрального квадратического отклонения, использующий регрессионные зависимости отклонений поверхности от давления обработки и скорости инструмента.

Предложенная методика обеспечивает максимизацию качества единичного изготавливаемого изделия, что позволяет повысить эффективность технологического процесса в условиях серийного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L.Fengwei, W.Yongqian, C. Qiang, L. Haitao, Y. Fengtao, Z. Shiyang, W. Yongjian, W. Fan Overview of advanced manufacturing technology of large-aperture aspheric mirror. Opto-Electronic Engineering. 2025, 47(10), 200203-1.
2. S. Kumar, Z. Tong, X. Jiang, Advances in the design and manufacturing of novel freeform optics. International Journal of Extreme Manufacturing. 2022, 4(3), 032004.
3. A.Zhukov, E.Bobrova, I.Popov, D.Agena, System analysis of technological processes. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024, 17(4), 73-82.
4. D. Buade, W. Miller The engineering design of systems: models and methods. John Wiley & Sons, 2024. - 434p
5. A. Keshvarparast, D. Battini, O. Battaia, A. Pirayesh, Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda. Journal of Intelligent Manufacturing, 2024, 35(5), pp. 2065-2118.
6. J. Sawicki, T.Paczkowski Electrochemical machining of curvilinear surfaces of revolution: analysis, modelling, and process control. Materials. – 2022. – V. 15 (21). – pp. 7751.
7. Неменко А.В. Управление процессом получения поверхностей второго порядка при финишной обработке /А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2020, №4(342), С. 52-58.
8. 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. 16-22.
9. Неменко А.В. Прикладные вопросы оценки технического состояния судовых механических систем/А.В. Неменко, М.М. Никитин - М.: Инфра-М, 2017 – 172 с.
10. Пантюхина Е.В. Применение статистических методов для оценки производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств для штучных заготовок/ Пантюхина Е.В., Пантюхин О.В., Васин С.А., Борисов А.А.//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2024, №4(366), С. 132-138.

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.

CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESS WHILE MANUFACTURING OF PRODUCTS WITH SECOND ORDER SURFACES

Abstract. We propose a method for controlling the technological process of finishing a curvilinear surface by holding an integral deviation of the surface parameters within established limits. To predict the asymptotic value, an estimation of integral deviation at different points of time is performed and a continuous function passing through the

sequence of the measured points is obtained. The resulting function is then expanded into series in positive and negative powers of time, the coefficients of which are mutually related. As a result, the asymptotic value of the integral error is found as the free term of the series in negative powers of time or as a linear combination of all coefficients in the series in positive powers. For control purposes, the resulting linear combination is written into functions of adjustable process parameters, such as the average process force or average processing speed. If the predicted integral error value exceeds the permissible range, a corrective action is generated, assigning values to the parameters that return the new prediction to the permissible range. The proposed algorithm is non-parametric with respect to the class of the surface being processed and uses fairly general patterns applicable to the finishing of a wide range of products.

Keywords: parts of machines, second-order surfaces, finishing, technological fatigue, cyclic loading.

BIBLIOGRAPHY

1. L.Fengwei, W.Yongqian, C. Qiang, L. Haitao, Y. Fengtao, Z. Shiyang, W. Yongjian, W. Fan Overview of advanced manufacturing technology of large-aperture aspheric mirror. Opto-Electronic Engineering. 2025, 47(10), 200203-1.
2. S. Kumar, Z. Tong, X. Jiang, Advances in the design and manufacturing of novel freeform optics. International Journal of Extreme Manufacturing. 2022, 4(3), 032004.
3. A.Zhukov, E.Bobrova, I.Popov, D.Agena, System analysis of technological processes. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024, 17(4), 73-82.
4. D. Buede, W. Miller The engineering design of systems: models and methods. John Wiley & Sons, 2024. - 434p
5. A. Keshvarparast, D. Battini, O. Battaia, A. Pirayesh, Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda. Journal of Intelligent Manufacturing, 2024, 35(5), pp. 2065-2118.
6. J. Sawicki, T.Paczkowski Electrochemical machining of curvilinear surfaces of revolution: analysis, modelling, and process control. Materials. – 2022. – V. 15 (21). – pp. 7751.
7. Nemenko A.V. Upravlenie processom polucheniya poverhnostej vtorogo poryadka pri finishnoj obrabotke /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii,2020,№4(342),S. 52-58.
8. Nemenko A.V. Ocenki kachestva izdelij s poverhnostyami vtorogo poryadka/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii,2025,№1(369),S. 16-22.
9. Nemenko A.V. Prikladnye voprosy ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya sudovyh mekhanicheskikh sistem/A.V. Nemenko, M.M Nikitin - M.: Infra-M, 2017 – 172 s.
10. Pantyuhina E.V. Primenenie statisticheskikh metodov dlya ocenki proizvoditelnosti mekhanicheskikh diskovyh bunkernyh zagruzochnykh ustrojstv dlya shtuchnykh zagotovok/ Pantyuhina E.V., Pantyuhin O.V., Vasin S.A., Borisov A.A.//Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii,2024,№4(366),S. 132-138.

NemenkoAleksandraVasilyevna

Federal State Autonomous Educational Foundation
«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
«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., 2026

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА

УДК 623.17

DOI: 10.33979/2073-7408-2026-376-2-116-126

СПИРИН М.С., КОСАРИЧ М.Б., НАГОРНЫЙ В.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация. Данная статья нацелена на выработку объективных критериев оценки эффективности РТК ВН, что позволит обеспечить прозрачность, надёжность внедрения роботизированных систем в оборонные структуры страны.

Ключевые слова: РТК ВН, критерии оценки эффективности, классификация.

Введение

В условиях стремительного развития военных технологий и растущей роли робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) в системе национальной безопасности, актуальность создания единых критериев и систематизированных подходов к оценке их эффективности становится особенно очевидной.

Несмотря на наличие ряда концептуальных документов, отражающих видение роботизации вооружённых сил различных родов войск, существующая документация преимущественно носит локальный характер и зачастую не обладает необходимой целостностью и системностью, потому что с каждым днем количество РТК ВН увеличивается, вместе с этим повышается их функционал и возможности использования при ведении боевых действий. Стоит учесть тот факт, что в скором времени РТК ВН займет свое место в номенклатуре ВВСТ ВС РФ. Это является еще одной причиной для разработки комплексного подхода к системе оценки эффективности РТК ВН [1].

Анализ существующих представлений и документов выявляет ряд существенных недостатков, среди которых выделяются:

1. Отсутствие методики применения робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН), которая четко формулирует перечень задач, решаемых комплексом, и оправданность его применения для ожидаемого эффекта от его применения;
2. Анализ оценки эффективности РТК ВН проводится индивидуально, вследствие этого отражается лишь специфические интересы разных силовых и ведомственных структур, что приводит к разобщённости подходов к разработке и применению РТК ВН;
3. Отсутствие единой методики оценки эффективности РТК ВН, которая основывается на опыте современных военных конфликтов;
4. Отсутствие специализированных методик проведения испытаний и оснащения экспериментально-испытательной базы, которые позволяют комплексно оценить и испытать возможности современных РТК ВН назначения;
5. Отсутствие единых стандартов системы обучения, которые позволяют проводить качественное обучение операторов РТК ВН;
6. Отсутствие согласованного и общепринятого терминологического аппарата, что приводит к разночтениям в определении характеристик и функциональных возможностей РТК.
7. Отсутствие документов определяющих жизненный цикл РТК ВН;

Отдельно стоит отметить, что отсутствие системы эксплуатации, ремонта и управления жизненным циклом приводит к ряду существенных проблем, если опираться на данные из ГОСТ Р 56136-2014 и основные понятия, термины и определения, установленные ГОСТ 27.002-2015, который задает определения для надежности, отказоустойчивости и ремонтпригодности, что позволяет создать единые критерии оценки для оценки эксплуатационных характеристик и жизненного цикла изделий.

Отсутствие интегрированной системы управления, основанной на таких критериях, как безотказность, время восстановления и наработка до отказа, приводит к тому, что процессы оперативного ремонта и восстановления работоспособности РТК не соответствуют установленным нормативам. В частности, отсутствие систематизированного подхода к оценке надежности, включающему показатели вероятности безотказной работы и интенсивности

отказов, затрудняет своевременное выявление и устранение дефектов, будь то внезапный или конструктивный отказ.

Все это создаёт необходимость формирования комплексного подхода к развитию отечественной военной робототехники, необходимости создания системы комплексной оценки эффективности РТК ВН.

Основная часть

В предыдущих статьях, была проведена оценка эффективности РТК ВН по следующим критериям: проходимость, скорость. Грузоподъемность, размеры, масса, дальность связи, время автономной работы, модульность, тип связи, степень зависимости от оператора, тип шасси. Используя данные критерии невозможно провести комплексную оценку существующих изделий.

Исходя из этого появляется необходимость в систематизации и расширении критериев оценки. Проведя анализ была создана модель для оценки эффективности РТК ВН, в которой было выделено 6 основных групп критериев, позволяющих провести оценку РТК ВН более детально, учитывая их специфику.

Предложенная модель базируется на следующих группах:

1. Сигнало-канальные характеристики;
2. Осваиваемость;
3. Массо-габаритные параметры;
4. Уровень влияния факторов;
5. Надёжность;
6. Тактическая эффективность.

Подробная схема показана на рисунке 1.

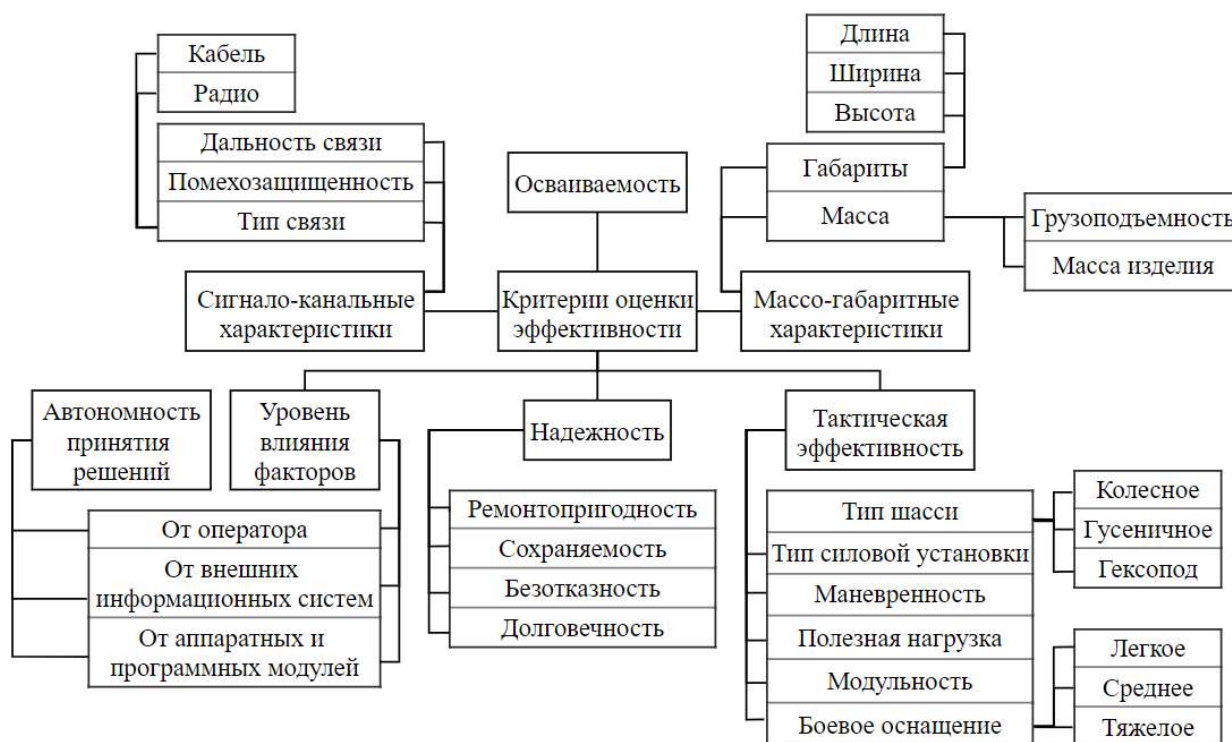


Рисунок 1 – Схема критериев оценки эффективности РТК

Каждый блок включает в себя дополнительные критерии, такие как помехозащищенность, модульность или ремонтпригодность, обеспечивая анализ возможностей РТК. Например, массо-габаритные характеристики напрямую влияют на мобильность платформы, определяя её совместимость с транспортной инфраструктурой войск, тогда как тип силовой установки влияет на автономность и малозаметность, формируя базис для оценки тактической гибкости [21].

Унификация критериев в рамках предложенных блоков позволяет более эффективно проводить анализ РТК. Так, параметр модульность не только повышает универсальность РТК за счёт сменных компонентов, но и усиливает ремонтпригодность, сокращая время

восстановления в полевых условиях. Степень зависимости от оператора, оцениваемая через уровень автономности алгоритмов управления, дополняется осваиваемостью техники, включающей эргономику интерфейсов и тренажёрные комплексы, что в совокупности снижает риски негативного человеческого фактора.

Далее рассмотрим функциональные группы подробнее и обоснуем каждый из предложенных критериев для оценки эффективности РТК ВН.

Массогабаритные характеристики

Критически важным элементом является разделение РТК на типы по массе. Так, согласно военному стандарту ГОСТ РВ 0098-0.002-2019 РТК ВН можно разделить на классы и подклассы, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Типы РТК ВН по массе

№ п/п	Класс	Подкласс
1	Малые	Носимые микро
		Носимые мини
		Легкие
2	Средние	Возимые средние
		Самоходные средние
3	Самоходно тяжелые	–/–

Такое разделение позволяет учесть специфику их применения. Так малые системы оптимальны для разведки или диверсионной деятельности на линии боевого соприкосновения и нейтральной фронтовой зоне, средние – для огневой поддержки, транспортировки грузов к фронтовой линии и эвакуации раненых, самоходные тяжелые – для решения задач высокой ударной мощи или при решении инженерных задач.

Также в рамках данного критерия необходимо рассматривать габариты изделия. Так, согласно ГОСТ 9238-2013, РТК ВН не должны превышать габариты грузового вагона для возможности быстрой доставки комплекса к месту выполнения задач с помощью военной и гражданской инфраструктуры.

Надёжность

Надёжность согласно ГОСТ Р 27.102-2021 – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Данный критерий необходим для оценки возможностей РТК ВН к ремонтпригодности, сохраняемости и долговечности при эксплуатации техники при выполнении задач в боевых условиях.

В стандартах ГОСТ Р 27.102-2021, ГОСТ Р 56136–2014 и требований промышленной безопасности ГОСТ 12.2.07298 данный критерий включает следующие параметры:

Безотказность – это, согласно ГОСТ Р 27.102-2021, свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения. Данное свойство является ключевым показателем надёжности РТК, определяющим успешность выполнения задач. Повышение безотказности снижает риски отказов и повышает качество работы сложных систем и напрямую влияет на боевую эффективность в сложных боевых и погодных условиях.

В условиях сложной эксплуатации, где возможны комплексные отказы, безотказность достигается за счёт применения методов мониторинга и диагностирования отказов, а также надёжности критически важных модулей, таких как шасси, двигательная установка привода баши, системы управления огнём, гидравлического контур, систем охлаждения двигателя, система навигации, наблюдения и так далее.

Кроме того, безотказность обеспечивается за счёт резервирования на уровне систем, модулей и компонентов, что позволяет поддерживать критически важные функции даже при частичных отказах. В совокупности эти меры повышают живучесть РТК, обеспечивая их надёжную работу в условиях боевых действий, ограниченной связи и воздействия внешних факторов.

Для выявления показателя надёжности можно опираться на следующие параметры расчета безотказности, которые определяются в ГОСТ Р 27.102-2021 и ГОСТ Р 27.010–2019:

1. Вероятность безотказной работы;
2. Нарботка на отказ;

3. Интенсивность отказов;

4. Ремонтпригодность и восстановление – это, согласно ГОСТ Р 27.102-2021, свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Этот параметр играет ключевую роль для обеспечения непрерывной и эффективной работы в сложных условиях эксплуатации. Особое внимание уделяется возможности проведения ремонта в полевых условиях, что требует упрощения конструкции, стандартизации узлов и обеспечения быстрого доступа к ремонтируемым элементам.

Таким образом, ремонтпригодность и восстановление в РТК ВН должны обеспечивать их оперативное возвращение в строй даже в экстремальных и аварийных ситуациях.

5. Сохраняемость, согласно ГОСТ Р 51372-99 и ГОСТ Р 27.102-2021 сохраняемость в РТК можно определить, как способность комплекса сохранять работоспособность и технические характеристики в условиях воздействия внешних неблагоприятных факторов, таких как механические нагрузки, вибрации, климатические условия, а также повреждения при выполнении боевых и специальных задач.

Для повышения сохраняемости РТК применяются прочные и устойчивые к износу материалы, защищённые конструктивные решения, а также системы мониторинга состояния узлов и агрегатов, что позволяет своевременно выявлять и предотвращать критические отказы.

Кроме того, необходимо учитывать устойчивость к воздействию электромагнитных помех и возможность работы в сложных условиях связи и местности. Высокая сохраняемость обеспечивает надёжность функционирования комплекса в длительных операциях и экстремальных ситуациях, что особенно важно для военного и специального назначения.

Для точной оценки критерия, согласно ГОСТ Р 60.0.7.2-2020 и ГОСТ 30630.1.2-99, а также военных ГОСТ РВ 20.39.304-98 и ГОСТ РВ 20.57.305-98 можно опираться на следующие параметры:

1. Температурные диапазоны;

2. Виброустойчивость;

3. Срок сохраняемости;

4. Долговечность. Для РТК надёжность – это прежде всего гарантия стабильной работы в любых, порой экстремальных, условиях. Когда счет идёт на месяцы и годы, нагрузка достигает предела, а отказы могут носить одновременно высокоинтенсивный и комплексный характер.

Данный параметр определяет экономическую эффективность эксплуатации и напрямую влияет на надёжность системы в долгосрочной перспективе.

Он достигается из совокупности критериев, которые описаны выше, так как для достижения данного критерия необходимо учитывать безотказность, сохраняемость и ремонтпригодность как единое целое. Необходимо найти баланс между ценой производства комплекса, ценой его дальнейшего эксплуатации и эффективностью его применения при выполнении по назначению задач, для того чтобы использование РТК ВН было экономически эффективно.

Тактическая эффективность

Тактическая эффективность РТК ВН определяется совокупностью характеристик, обеспечивающих успешное выполнение боевых задач в условиях динамично изменяющейся оперативной обстановки.

Данный критерий необходим для оценки возможностей РТК ВН к выполнению поставленных перед ним задач в условиях разнородного рельефа местности, тактической и боевой обстановки.

Ключевыми параметрами являются тип шасси, силовая установка, маневренность, полезная нагрузка, модульность и боевое оснащение, каждый из которых требует оценки с учётом специфики современных боевых действий. Рассмотрим каждый из них подробнее:

Тип шасси. Критерий определяет базовую мобильность комплекса к рельефу местности.

Для техники военного назначения существует два базовых вида шасси, колесное и гусеничное, однако, основываясь на разработках некоторых отечественных и зарубежных компаний для малых и средних комплексов разведывательного типа, можно ввести еще один тип шасси – гексоподные. Типы шасси представлены в таблице 2.

Так, колесные платформы обеспечивают повышенную скорость перемещения на твердых покрытиях, гусеничные – преодоление пересеченной местности и траншей, гексоподы – повышенную стабильность на сложном рельефе за счет распределенной опорной

базы, а также преодоление высоких препятствий для работы в горной местности и городских условиях.

Таблица 2 – Виды шасси

№ п/п	Тип шасси	Изображение
1	Колесное	 <i>Рисунок 2 – Колесное шасси</i>
2	Гусеничное	 <i>Рисунок 3 – Гусеничное шасси</i>
3	Гексоподное	 <i>Рисунок 4 – Гексоподное шасси</i>

Стоит также отметить привязанность данного параметра к массе РТК ВН. Необходимо учитывать, что для малых и средних комплексов применимы все типы шасси, однако для тяжелых РТК будет предпочтителен колесный или гусеничный вариант ввиду более равномерного распределения нагрузки на грунт и более надежной и стабильной конструкции, а также из-за экономической неоправданности и сложности производства гексоподной платформы для больших РТК.

Тип силовой установки определяет автономность, скрытность и живучесть РТК ВН. Для большей наглядности стоит разбить виды силовых установок по типу энергоносителя (таблица 1) и привязать их к классификации РТК ВН по массе, которая приводилась выше.

Таблица 3 – Виды силовых установок по типу энергоносителя

Тип энергоресурса	Пример двигательной установки	Нормативная база
Жидкое топливо	Двигатели внутреннего сгорания	ГОСТ 10448-2014, ГОСТ 23851-79, ГОСТ Р 58989-2020, ГОСТ Р 51852-2001
Электрическая энергия	Асинхронные, синхронные, постоянного тока	ГОСТ Р 51689-2000, ГОСТ 11828-86

Электрические установки снижают тепловую и акустическую заметность, которые являются важными параметрами при ведении разведывательной деятельности. Также стоит отметить, что такие установки могут обладать малыми размерами, что необходимо для малых и средних РТК ВН.

Гибридные схемы обеспечивают баланс между дальностью действия и маневренностью, необходимой для выполнения задач в условиях ограниченной логистики. Для такого строения силовой установки не нужен большой двигатель внутреннего сгорания (ДВС), так как мощность для передвижения затрачивают электродвигатели, а сам ДВС служит только приводом для генератора, который заряжает аккумуляторы. Данные характеристики хорошо подходят для РТК ВН среднего класса, особенно для РТК ВН транспортного типа.

ДВС, несмотря на высокую заметность, остаются незаменимыми для тяжелых РТК ВН, выполняющих задачи штурмового характера с интенсивным энергопотреблением или при решении инженерных задач, что также требует огромных энергозатрат.

Маневренность включает в себя скорость, маневренность и способность преодолевать препятствия, что определяет оперативность реагирования на угрозы.

Способность РТК быстро набирать требуемую скорость обеспечивает возможность занятия выгодных позиций или их своевременное покидание, а малый радиус разворота – эффективное маневрирование в ограниченном пространстве. Параметры преодоления брода и угла подъема влияют на преодоление РТК ВН различных рельефов местности. Снижение данных показателей приводит к ограничению тактических сценариев использования и большей уязвимости комплекса на поле боя.

Для шагающих платформ ключевым параметром будет являться точность позиционирования конечностей при движении по ступеням или завалам.

Полезная нагрузка – это соотношение массы вооружения, оборудования или перевозимой полезной массы к собственной массе платформы. Данный критерий определяет функциональную универсальность, которая выявляется задачей, стоящей перед РТК ВН.

Недостаточная грузоподъемность вынуждает жертвовать либо защитой, либо огневой мощностью, снижая боевую эффективность, или возможностью выполнять те или иные задачи по транспортировке грузов или решению инженерных задач. Такие недостатки могут увеличивать время нахождения РТК ВН в зоне обнаружения, что ставит под угрозу не только сам комплекс, но и маршруты и позиции, по которым он перемещается.

Решением проблемы с недостаточной грузоподъемностью может стать более производительное шасси или модульность системы, однако данные методы могут повлиять на экономическую эффективность изделия.

Модульность – по ГОСТ Р 52070-2003 означает четкую стандартизацию интерфейсов и модулей системы. Благодаря этому механизму можно быстро и без серьезных переделок заменять ключевые элементы – будь то двигатель, шасси или боевой модуль и оперативно адаптировать систему к новым задачам. Такой подход обеспечивает гибкость развития и надежность функционирования в меняющихся условиях.

Это позволит унифицировать компонентную базу между разными РТК ВН одного типа, а также предоставит возможность проводить текущий и средний ремонт в полевых условиях с минимально необходимым набором инструмента и персонала, что увеличивает экономическую эффективность использования системы, ее надежность и взаимозаменяемость деталей и компонентов с другими РТК ВН.

Боевое оснащение – это модули и системы вооружения и инженерных систем, которыми оснащается РТК ВН для решения поставленных задач.

Для оценки боевых возможностей разных РТК ВН стоит провести прямую аналогию с приведенным в пункте «Массогабаритные характеристики» разбиением комплексов по классам в зависимости от массы и ввести следующую классификацию для боевого оснащения:

- 1) Легкое;
- 2) Среднее;
- 3) Тяжелое.

Легкое оснащение устанавливается на РТК легкого класса. Ввиду их малой грузоподъемности данное оснащение может состоять из систем наблюдения в разных видимых и невидимых спектрах, а также системами измерения и позиционирования при выполнении разведывательных задач. Также стоит отметить, что при необходимости легкие РТК можно оснастить боевым зарядом, например, противотанковой миной ТМ-62 (рисунок 5), и использовать комплекс для минно-подрывной или диверсионной деятельности.



Рисунок 5 – НРТК «Курьер» с автоматизированным модулем АГС-17 и конвейерами миноукладчиками



Рисунок 6 – НРТК «Стрелок» с автоматизированным модулем огня на базе ПКП 7,62x39

Среднее оснащение, помимо средств наблюдения и позиционирования, может включать в себя легкие боевые модули, такие как «Прометей», который может обладать стабилизированными пулеметными модулями ПКП 7,62x39 (рисунок 6) или КОРД 12,7x108 в зависимости от комплектации, или же такой же системой с автоматическим гранатометом АГС-30, АГС-40 (рисунок 5) и другими подобными модулями, системами конвейерного минирования, или минирования по области.



Рисунок 7 – Боевой модуль Б-30-Д «Спица»

Тяжелое оснащение позволит использовать в связке с оснащением среднего класса боевые модули среднего и тяжелого типа, например, боевой модуль Б-30-Д «Спица» (рисунок 7), который оснащен 30мм автоматической пушкой 2А42. Также грузоподъемность тяжелых РТК позволит внедрить комплексы управляемых ракет, таких как например 9М113 «Корнет» и другие подобные комплексы.

Уровень влияния факторов

Уровень влияния факторов определяет зависимость РТК ВН от внешних факторов, которые прямым образом влияют на его тактические и боевые возможности, способность продолжать выполнять поставленную задачу в условиях постановки помех, а также при выходе из строя внутренних модулей комплекса.

Данный критерий необходим для оценки возможности РТК ВН, в случае потери связи или выхода из строя внутренних модулей, автономно и независимо от систем позиционирования и оператора продолжить выполнять задачу.

Ключевыми параметрами данного критерия является зависимость от: оператора, внешних информационных систем, аппаратных и программных модулей. Рассмотрим их подробнее:

Зависимость от оператора. Данный параметр отвечает за возможность РТК ВН выполнять задачи в автономном или полуавтономном режиме, в соответствии с поставленным комплексу боевым заданием.

Также сюда можно отнести возможность выполнения некоторых задач РТК ВН самостоятельно, например, возможность передачи управления движением комплексу, оставляя право управления боевым, разведывательным или инженерным модулем у оператора, что позволяет более точно отслеживать оперативную обстановку и быстрее реагировать на чрезвычайные ситуации

Необходимо учитывать боевую и тактическую обстановку. Так, при потере связи с оператором, комплекс должен быть способен самостоятельно вернуться в точку последнего контакта с ним, или же продолжить движение по маршруту и выполнение задачи, однако последние, на данный момент времени, реализовано не в полном объеме.

При снижении значения данного параметра появляется возможность снизить число операторов, которые необходимы для управления одной единицей техники и соответственно снизить стоимость обучения, однако это приводит к возрастанию цены самого изделия из-за повышения уровня автономности и интеллекта самого комплекса, а это:

1. Более дорогие вычислительные модули и сертифицированные контроллеры, способные работать в реальном времени и обеспечивать безопасное принятие решений, исключая человеческий фактор;
2. Разработка, валидация и сертификация соответствующего программного обеспечения (алгоритмов автономного управления, распознавания препятствий, оценки рисков и т. д.) требуют дополнительных ресурсов и времени;
3. Набор высокоточных датчиков (лидары, стереокамеры, ИН-приборы) и средств связи с резервированием каналов;
4. Более высокий уровень тестирования и гарантийной поддержки – автономность нивелирует участие оператора, поэтому ответственность за безопасность и надёжность ложится на изготовителя.

Зависимость от внешних информационных систем.

Данный критерий позволяет определить возможность РТК ВН позиционировать себя в пространстве при потере связи со спутниковыми системами навигации, а также при потере связи с оператором.

Так, например, при потере связи с источником управления и системой позиционирования, комплекс должен самостоятельно вернуться в точку последнего контакта со спутником или оператором, или же самостоятельно продолжить движение по заданному маршруту.

При отсутствии такого сценария поведения появляется риск потери РТК ВН, или захват его противником, что может привести к утечке информации о точке старта комплекса и раскритерить позиции операторов, или же к ситуации использования комплексе стороной противника.

Зависимость от аппаратных и программных модулей.

Данный параметр напрямую связан с критерием надежности и определяет зависимость комплекса от встроенных модулей и программных компонентов.

Как и описывалось в пункте «Надежность», комплекс должен обладать системами дублирования и предотвращения отказов со стороны аппаратной части комплекса, а также обладать дублированием на программной уровне.

Так в случае выхода из строя критически важного модуля или программного компонента, комплекс сможет адаптироваться, заменив сигнал двойником. Данный параметр

необходим для оценки живучести комплекса при выполнении задач в экстремальных условиях.

Сигнало-канальные характеристики (ОСТ 45.65-96, ГОСТ Р 50397-92)

Данный критерий является одним из основных и определяет возможность РТК ВН поддерживать связь с оператором системы, что позволяет выполнять задачи в условиях радиопомех и сложной электромагнитной обстановки.

При выполнении задач в нейтральной и прифронтовой зоне противник, так или иначе, будет применять средства противодействия РТК ВН, поэтому появляется необходимость проверки и оценки таких параметров как дальность связи, а также помехозащищенность.

Для оценки данных параметров необходимо учесть, что в настоящее время существует два основных вида связи, а именно:

1. Радио-канальный;
2. Проводной или оптоволоконный.

Другие виды связи, например, спутниковая связь, сильно опираются на инфраструктуру и финансовую целесообразность внедрения в РТК ВН. Так, для РТК ВН малого и среднего класса они будут избыточны, а для РТК тяжелого класса, которые выполняют инженерные и боевые задачи в прифронтовой зоне, такая связь позволит сократить число операторов и автоматизировать процесс. Поэтому в данной статье предлагается рассматривать только эти два варианта.

Рассмотрим параметры подробнее:

Дальность связи – параметр определяет, на какое расстояние без потери сигнала способен удалиться РТК ВН станции передачи сигнала управления. При повышении данного параметра будет повышаться и тактическая эффективность РТК ввиду увеличения его радиуса действия.

Также необходимо учитывать, что рельеф местности и физические помехи между станцией влияют на эффективность передачи сигнала и комплексом.

Помехозащищенность – параметр, который определяет способность передавать сигнал в условиях радиоэлектронной борьбы. Данный параметр также влияет на Тактическую эффективность изделия, так как при постановке помех оператор не сможет управлять РТК, и, соответственно, не сможет выполнить задачу.

При оценке необходимо учитывать поставленную задачу, оперативную и боевую обстановку. Так, например, по дальности связи явным фаворитом будет радио-канальный способ передачи сигнала управления, особенно, если для передачи сигнала используются ретрансляторы. Такой вид связи подходит для работы на дальние расстояния, что уменьшает подверженность оператора риску, однако комплекс в этом случае подвержен радиопомехам, что делает РТК уязвимым при потере сигнал.

Оптоволоконный кабель помехоустойчив и способен выполнять задачи даже в условиях полного отсутствия другого сигнала, однако сильно ограничен в радиусе действия, что делает необходимым нахождение оператора в ближней прифронтовой или даже нейтральной зоне. Также он уязвим к механическим повреждениям, которые постоянно происходят при выполнении боевой задачи.

Заключение

Таким образом используя государственные отраслевые стандарты, были предложены ключевые критерии оценки эффективности РТК ВН, которые необходимо учитывать при разработке и эксплуатации РТК ВН.

Используя выработанные критерии, мы можем осуществить комплексный анализ уже существующих РТК ВН, а также выдвигать требования к разрабатываемым. Опираясь на выдвинутые критерии оценки, возможно вести классификацию РТК ВН, которой не существует на данный момент, а также, в будущем, сформировать требуемые тактико-технические характеристики к разрабатываемым комплексам. Это может положительно повлиять на общий подход к построению типовых моделей комплексов военного назначения.

Для определения конкретных требований к разработчикам РТК ВН существует необходимость более детального рассмотрения каждой группы критериев для определения конкретных параметров, числовых значений и условий, которые необходимо учитывать при разработке РТК ВН, для того чтобы повысить эффективность их эксплуатации.

В итоге предложенные ключевые критерии оценки эффективности РТК ВН выступают не просто методологическим инструментом, а базисом для формирования единой системы требований на всех этапах жизненного цикла комплексов – от проектирования и испытаний до эксплуатации.

Использование этих критериев в процесс стандартизации позволит обеспечить постоянность результатов оценок, прозрачность процедуры верификации и объективность принятия решений при выборе наиболее подходящих моделей комплексов для военных задач. В перспективе дальнейшая детализация критериев даст возможность применять их к самым разным типам РТК ВН, гарантируя требуемый баланс между тактико-техническими свойствами, стоимостью и оперативной надёжностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анохин, А. А. Робототехнические комплексы военного назначения: состояние, классификация и перспективы развития / А. А. Анохин // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. – 2020. – № 1(8). – С. 218-225. – EDN YUQCVK.
2. Мамон, Ю. И. Анализ критериев оценки эффективности применения робототехнических комплексов специального назначения / Ю. И. Мамон, Н. Д. Федянин, А. С. Курбатский // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kriteriev-otsenki-effektivnosti-primeneniya-robototekhnicheskikh-kompleksov-spetsialnogo-naznacheniya> (дата обращения: 18.06.2025)
3. ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов.
4. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей.
5. ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения.
6. ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике.
7. ГОСТ 9238-2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений.
8. ГОСТ 12.2.072-98. Роботизированные технологические комплексы.
9. ГОСТ 10448-2014. Двигатели внутреннего сгорания поршневые.
10. ГОСТ 23851-79. Двигатели газотурбинные авиационные.
11. ГОСТ Р 58989-2020. Неразрушающий контроль основных деталей.
12. ГОСТ Р 51852-2001. Установки газотурбинные.
13. ГОСТ Р 51689-2000. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно.
14. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся
15. ГОСТ Р 50397-92. Совместимость технических средств электромагнитная.
16. Гречушкин, И. В. Оценка технического уровня наземных робототехнических комплексов военного назначения / И. В. Гречушкин, А. В. Федосеев // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2019. – № 3(4). – С. 98-102. – EDN ZEDBGB.
17. Монахова, К. В. Перспективы развития наземных робототехнических комплексов военного назначения / К. В. Монахова, Ю. В. Кесов // Информационные системы и технологии : перспективы развития : сборник материалов I Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 26 октября – 07 2017 года. – Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью "Центр развития научного сотрудничества", 2017. – С. 142-147. – EDN ZVWOPR.
18. Состояние и проблемы стандартизации и унификации наземных робототехнических комплексов военного назначения / С. Г. Цариченко, Е. А. Антохин, П. Д. Чернова, В. П. Дементей // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 18-23. – DOI 10.31776/RTSJ.8102. – EDN AXRIUN.
19. Нестеренко, А. Н. Робототехнические комплексы в силовых структурах: основные направления развития / А. Н. Нестеренко, В. В. Горюшко // Военно-правовые и гуманитарные науки Сибири. – 2021. – № 2(8). – С. 96-99. – EDN AOOGZT.
20. Макаренко, С. И. Робототехнические комплексы военного назначения - современное состояние и перспективы развития / С. И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 2. – С. 73-132. – DOI 10.24411/2410-9916-2016-10204. – EDN WKBPWJ.
21. Спирин, М. С. Предложение по определению критериев оценки наземных робототехнических комплексов военного назначения / М. С. Спирин, М. Б. Косарич // Наука и военная безопасность. – 2025. – № 3(42). – С. 27-37. – EDN FGCJBI.

Спирин Максим Сергеевич
Федеральное государственное автономное учреждение «военный инновационный технополис «эра»
Адрес: 353456, Россия, г. Анапа, Пионерский пр-кт, д. 41
Кандидат технических наук, начальник научного исследовательского отдела
E-mail: era_otd2@mil.ru

Косарич Марк Богданович
Федеральное государственное автономное учреждение «военный инновационный технополис «эра»
Адрес: 353456, Россия, г. Анапа, Пионерский пр-кт, д. 41
Командир 1 взвода (научного) 2 роты (научной) – младший научный сотрудник
E-mail: markkosaritch@yandex.ru

Нагорный Владимир Алексеевич
Федеральное государственное автономное учреждение «военный инновационный технополис «эра»
Адрес: 353456, Россия, г. Анапа, Пионерский пр-кт, д. 41
Оператор 1 взвода (научного) 2 роты (научной)
E-mail: bolotniu@yandex.ru

DETERMINATION OF CRITERIA FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF MILITARY-GRADE ROBOTIC SYSTEMS

Abstract. *This article is aimed at developing objective criteria for evaluating the effectiveness of RTK VN, which will ensure transparency and reliability of the implementation of robotic systems in the countrys defense structures.*

Keywords: *RTK VN, performance evaluation criteria, classification.*

BIBLIOGRAPHY

1. Anokhin, A. A. Robotic complexes for military purposes: status, classification and development prospects / A. A. Anokhin // Bulletin of the Yaroslavl Higher Military School of Air Defense. – 2020. – № 1(8). – Pp. 218-225. – EDN YUQCVK.
2. Mamon, Yu. I. Analysis of criteria for evaluating the effectiveness of the use of special-purpose robotic systems / Yu. I. Mamon, N. D. Fedyanin, A. S. Kurbatsky // News of TulSU. Technical sciences. - 2022. - No. 2. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kriteriev-otsenki-effektivnosti-primeneniya-robototekhnicheskikh-kompleksov-spetsialnogo-naznacheniya> (data obrashcheniya: 18.06.2025)
3. GOST R 51372-99. Methods of accelerated testing for durability and durability under the influence of aggressive and other special environments for technical products, materials and systems of materials.
4. GOST R 52070-2003. The backbone serial interface of the electronic module system.
5. GOST R 56136-2014. Life cycle management of military products.
6. GOST 27.002-2015. Reliability in technology.
7. GOST 9238-2013. Dimensions of railway rolling stock and building approaches.
8. GOST 12.2.072-98. Robotic technological complexes.
9. GOST 10448-2014. Internal combustion engines are reciprocating.
10. GOST 23851-79. Gas turbine aircraft engines.
11. GOST R 58989-2020. Non-destructive testing of basic parts.
12. GOST R 51852-2001. Gas turbine installations.
13. GOST R 51689-2000. Asynchronous motors with power from 0.12 to 400 kW inclusive.
14. GOST 11828-86. Electric rotating machines
15. GOST R 50397-92. Electromagnetic compatibility of technical means.
16. Grechushkin, I. V. Assessment of the technical level of ground-based robotic complexes for military purposes / I. V. Grechushkin, A.V. Fedoseev // Actual problems of military scientific research. – 2019. – № 3(4). – Pp. 98-102. – EDN ZEDBGB.
17. Monakhova, K. V. Prospects for the development of ground-based robotic complexes for military purposes / K. V. Monakhova, Yu. V. Kesov // Information systems and technologies : development prospects : collection of materials of the I International Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, October 26 – 07, 2017. Novosibirsk: Limited Liability Company "Center for the Development of Scientific Cooperation", 2017. pp. 142-147. - EDN ZVWORP.
18. The state and problems of standardization and unification of ground-based robotic complexes for military purposes / S. G. Tsarichenko, E. A. Antokhin, P. D. Chernova, V. P. Dementey // Robotics and technical cybernetics. – 2020. – Vol. 8, No. 1. – pp. 18-23. – DOI 10.31776/RTCJ.8102. – EDN AXRIUN.
19. Nesterenko, A. N. Robotic complexes in law enforcement agencies: the main directions of development / A. N. Nesterenko, V. V. Goroshko // Military-legal and humanitarian sciences of Siberia. – 2021. – № 2(8). – Pp. 96-99. – EDN AOOGZT.
20. Makarenko, S. I. Robotic complexes for military purposes - current state and development prospects / S. I. Makarenko // Management, communication and security systems. – 2016. – No. 2. – pp. 73-132. – DOI 10.24411/2410-9916-2016-10204. – EDN WKBPWJ.
21. Spirin, M. S. A proposal to define criteria for evaluating ground-based robotic complexes for military purposes / M. S. Spirin, M. B. Kosarich // Science and military security. – 2025. – № 3(42). – Pp. 27-37. – EDN FGCJBI.

Spirin Maxim Sergeevich

Federal state autonomous institution
«military innovation technopolis
«era»
Address: 353456, Russia, Anapa,
Pionersky ave, 41
Candidate of Technical Science,
Head of the Scientific Research
Department
E-mail: era_otd2@mil.ru

Kosarich Mark Bogdanovich

Federal state autonomous institution
«military innovation technopolis
«era»
Address: 353456, Russia, Anapa,
Pionersky ave, 41
Commander of the 1st platoon
(scientific) of the 2nd company
(scientific) – junior researcher
E-mail: markkosaritch@yandex.ru

Nagorny Vladimir Alekseevich

Federal state autonomous
institution «military innovation
technopolis «era»
Address: 353456, Russia, Anapa,
Pionersky ave, 41
Operator of the 1st platoon
(scientific) of the 2nd company
(scientific)
(scientific)
E-mail: bolotniu@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА УДЕЛЬНУЮ МОЩНОСТЬ БДПТ

Аннотация. Бесколлекторные двигатели постоянного тока получили широкое распространение благодаря своим улучшенным механическим характеристикам в сравнении с другими типами электродвигателей. Одной из главных характеристик двигателей постоянного тока является удельная мощность, отражающая отношение механической мощности к массе двигателя. Данная характеристика особенно важна для двигателей, используемых в малоразмерных беспилотных летательных аппаратах. В данной статье представлен анализ научной литературы с целью определения зависимости изменения удельной мощности бесколлекторного двигателя постоянного тока от его технических параметров. По итогам анализа было выделено 12 основных параметров, влияющих на удельную мощность. В зависимости от степени влияния данные параметры были объединены по группам. На основании анализа были даны рекомендации по оптимизации параметров для повышения удельной мощности.

Ключевые слова: бесколлекторный двигатель постоянного тока, удельная мощность, анализ информации, параметры двигателя постоянного тока.

Введение.

Современная промышленность ориентирована на использование эффективных и надежных электродвигателей, среди которых особое место занимают бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ). Эти двигатели являются разновидностью синхронных двигателей, крутящий момент в БДПТ образуется за счет взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с постоянными магнитами ротора, вызывая его вращение. Данные двигатели, имеют высокий КПД, увеличенный срок службы из-за отсутствия изнашиваемых щеток, высокую скорость вращения, большой крутящий момент, компактные размеры, низкий уровень шума и вибраций [1-3]. Из-за чего данные тип двигателей получил наибольшее распространение там, где требуется высокая скорость вращения, а также высокая надёжность и большой срок эксплуатации, например в малоразмерных беспилотных летательных аппаратах [4].

Одним из главных преимуществ БДПТ является его высокая, в сравнении с другими типами двигателей, удельная мощность. Удельная мощность – это отношение вырабатываемой или потребляемой устройством мощности к другому конструктивному показателю. Значение удельной мощности позволяет сравнивать различные двигатели, независимо от их размеров и мощности [5]. В контексте бесколлекторных двигателей постоянного тока под удельной мощностью понимается отношение механической мощности к массе изделия и выражается следующей формулой [6]:

$$P_{уд} = \frac{P_{мех}}{m}, \quad (1)$$

где $P_{уд}$ – удельная мощность, Вт/кг;
 $P_{мех}$ – механическая мощность, Вт;
 m – масса двигателя, кг.

Как видно из формулы (1) изменение удельной мощности прямо пропорционально изменению механической мощности и обратно пропорционально изменению массы двигателя. Однако опираться на одну данную зависимость для оптимизации конструкции привода недостаточно. Для этого необходимо проанализировать взаимосвязь технических параметров БДПТ и на основе этого анализа сформировать перечень величин, влияющих на его удельную мощность и оценить степень влияния каждого из параметров, что является целью данной статьи.

Основная часть.

Согласно формуле (1) возможны 2 пути увеличения удельной мощности двигателя: увеличение механической мощности двигателя и снижение его массы.

Механическая мощность БДПТ описывается следующим выражением [7]:

$$P_{мех} = M \cdot \omega, \quad (2)$$

где M – крутящий момент, Н·м;
 ω – угловая скорость, рад/с.

Крутящий момент в электродвигателе – это вращающая сила, которую двигатель может развить на валу. В БДПТ, крутящий момент образуется путём взаимодействия магнитного поля и электрического тока, создающего вращательное движение. Математически крутящий момент можно выразить с помощью следующей формулы [8]:

$$M = (i_a \cdot e_{1a} + i_b \cdot e_{1b} + i_c \cdot e_{1c}) \cdot \Psi_f, \quad (3)$$

где i_a, i_b, i_c – токи фаз А, В и С соответственно;

e_{1a}, e_{1b}, e_{1c} – единичные функции формы ЭДС для фаз А, В и С соответственно;

Ψ_f – модуль вектора потокоцепления магнитов ротора с фазами статора.

Необходимо отметить, что помимо генерируемого БДПТ момента на его выходной вал воздействуют момент трения и момент внешнего сопротивления, вызванный нагрузкой на валу и иными внешними факторами [9]. Момент сопротивления заранее предсказать сложно, а момент трения имеет прямо пропорциональную зависимость от угловой скорости. Дифференциальное уравнение для определения угловой скорости вращения ротора будет иметь вид [10]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M - M_{\text{тр}} - M_c}{J}, \quad (4)$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент трения;

M_c – момент сопротивления;

J – совокупный момент инерции ротора и нагрузки.

Из формулы (3) видно, что для повышения крутящего момента можно увеличить ток статора или модуль вектора потокоцепления магнитов ротора с фазами статора. Однако стоит учитывать, что повышение тока статора понижает угловую скорость за счёт противодействия силового момента, возникающего при взаимодействии постоянных магнитов ротора и электрического поля статора [11,12]. Прямой линейной зависимости скорости вращения от тока статора нет. Вместо этого действует взаимосвязь через воздействие тока на механический момент, обеспечивающий поддержание заданной скорости при изменении нагрузки. То есть при увеличении нагрузки ток статора автоматически растёт, компенсируя снижение скорости, вызванное внешним воздействием [13]. Так же повышение тока приводит к увеличению тепловых потерь, что дополнительно снижает механическую мощность БДПТ. Оптимальное значение тока статора вычисляется по формуле [14]:

$$I_c = \sqrt{\frac{P_{\text{мех}}}{R_{\text{ст}}}}, \quad (5)$$

где I_c – значение тока статора;

$R_{\text{ст}}$ – активное сопротивление одной фазы статорной обмотки.

Данная формула является упрощенной моделью и даёт ориентировочное представление об оптимальной величине тока. Для точного расчёта необходимо учитывать дополнительные факторы, такие как магнитные насыщения сердечника, тепловые режимы и другие конструкционные особенности, которые подбираются в ходе моделирования в специализированных программах [15,16].

Повышение модуля вектора потокоцепления магнитов ротора с фазами статора в БДПТ способствует улучшению динамических характеристик, повышению момента и эффективности работы мотора. Для повышения данной величины в роторе БДПТ как правило используются редкоземельные магниты с высокой магнитной энергией, например, неодим-железо-бор (NdFeB) [17]. Увеличение числа пазов и уменьшение шага укладки проводов повышает плотность заполнения пазов проводниками, способствуя увеличению общей величины потокоцепления. Сокращение воздушного зазора между ротором и статором также значение вектора потокоцепления магнитов ротора с фазами статора [18]. Так же значение модуля вектора потокоцепления магнитов ротора с фазами статора можно увеличить за счёт применения синусоидальных сигналов управления фазами, данный способ управления приводит к уменьшению пульсаций и гармонических искажений, повышая качество взаимодействия магнитов и катушек [19]. Тем самым комплексный подход к выбору материалов, конструктивных решений и методов управления позволяет значительно повысить модуль вектора потокоцепления магнитов ротора с фазами статора в БДПТ обеспечивает прирост механической мощности.

Исходя из формулы (4) для повышения угловой скорости можно уменьшить момент трения, момент сопротивления и совокупный момент инерции ротора и нагрузки. Момент трения – это механический момент сопротивления вращению ротора двигателя, возникающий вследствие трения механических элементов внутри двигателя, таких как подшипники, воздухоподшипники и др., а также магнитного взаимодействия постоянных магнитов и статорной обмотки [20-22]. Момент трения определяется по следующей формуле [23]:

$$M_{\text{тр}} = k_1 + k_2 \cdot \omega, \quad (6)$$

где k_1 – постоянный компонент момента трения;

k_2 – коэффициент пропорциональности динамического компонента момента трения.

Постоянный компонент момента трения В БДПТ обусловлен статическими потерями при износе подшипников. В сравнении с щёточными двигателями у БДПТ данный показатель значительно меньше так как отсутствует трение щёток о ротор, так что в некоторых расчётах данной величиной пренебрегают [24].

Момент сопротивления БДПТ возникает вследствие взаимодействия магнитного поля ротора с током, протекающим в обмотках статора. Этот момент определяется уравнением [25]:

$$M_c = k_t \cdot I_c, \quad (7)$$

где k_t – коэффициент крутящего момента (также называемый константой мотора).

Для расчета коэффициента крутящего момента используется формула:

$$k_t = 2 \cdot \pi \cdot \Psi_f \cdot N \cdot p, \quad (8)$$

где N – число витков каждой обмотки;

p – число пар полюсов

Таким образом, величина момента сопротивления зависит от конструкции двигателя (числа витков, числа полюсов), а также от уровня нагрузки на вал двигателя. Чем больше нагрузка, тем больший ток необходим для поддержания заданной скорости вращения, что ведет к увеличению вращающего момента.

Как видно из формулы 1 повышение удельной мощности возможно за счёт сокращения массы двигателя. Однако сокращение габаритов двигателя приводит к непропорционально большому уменьшению его механической мощности [26]. В связи с этим основными способами сокращения массы двигателя с сохранением такой же мощности является поиск более лёгких материалов, оптимизации конструкции двигателя и разработки системы управления. Масса БДПТ складывается из масс стартера и ротора. Масса стартера складывается из массы сердечника стартера (9) и массой обмотки якоря (10) [27]:

$$m_{\text{сc}} = \left(\frac{\pi}{4} \cdot (D_a^2 - D_b^2) - S_{\text{п}}^{\text{п}} \cdot z \right) \cdot l_a \cdot \rho_c, \quad (9)$$

где $m_{\text{сc}}$ – масса сердечника стартера;

D_a – наружный диаметр якоря (статора);

D_b – внутренний диаметр машины, который подбирается исходя из требуемой площади паза;

$S_{\text{п}}^{\text{п}}$ – полная площадь паза;

z – число зубцов стартера;

l_a – длина средней магнитной линии в стартере;

ρ_c – плотность материала.

$$m_o = q \cdot l_{\text{ср}} \cdot W_{\phi} \cdot 3 \cdot \rho_m, \quad (10)$$

где m_o – масса обмотки якоря;

q – сечение витка;

$l_{\text{ср}}$ – длина среднего витка;

W_{ϕ} – число витков фазы;

ρ_m – плотность материала токопровода.

Масса ротора складывается из массы сердечника ротора (11) и массой магнитов (12).

$$m_{\text{ср}} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_{\text{н}}^2 - (D_{\text{н}} - 2 \cdot h_p)^2 \right) \cdot l_p \cdot \rho_c, \quad (11)$$

где $m_{\text{ср}}$ – масса сердечника ротора;

$D_{\text{н}}$ – наружный диаметр двигателя;

h_p – глубина средней магнитной линии в спинке ротора;

l_p – длина средней магнитной линии в спинке ротора;

$$m_m = 2 \cdot p \cdot l_m \cdot b_m \cdot h_m \cdot \rho_{\text{маг}}, \quad (12)$$

где m_m – масса магнитов;

p – число полюсов ротора;

l_m – длина магнита;

b_m – ширина магнита;

h_m – высота магнита;

$\rho_{\text{маг}}$ – плотность материала магнитов.

Исходя из формул (9-12) масса БДПТ равняется:

$$m = \left(\frac{\pi}{4} \cdot (D_a^2 - D_b^2) - S_{\text{п}} \cdot z \right) \cdot l_a \cdot \rho_c + q \cdot l_{\text{ср}} \cdot W_{\text{ф}} \cdot 3 \cdot \rho_m + \frac{\pi}{4} \cdot (D_n^2 - (D_n - 2 \cdot h_p)^2) \cdot l_p \cdot \rho_c + 2 \cdot p \cdot l_m \cdot b_m \cdot h_m \cdot \rho_{\text{маг}}. \quad (13)$$

Из представленных в уравнении (13) для повышения отношения изменения массы к изменению механической мощности можно использовать материалы с меньшей плотностью. В статье [28] было проведено исследование влияния материала сердечника статора и материала ротора на характеристики БДПТ. За основу был взят БДПТ с сердечником статора, изготовленным из стали марки М19 и ротором, изготовленным из низко углеродной стали марки 1010. В сравнении с данным образцом схожие электрические показатели со сниженной массой показал образец, где и сердечник статора, и ротор были изготовлены из низко углеродной стали марки 1010. Попытки заменить ферромагнитные материалы на полимеры резко снижают величину крутящего момента и одновременно увеличивают пульсации крутящего момента, что приводит к нестабильной работе. Однако остаётся вариант гибридного подхода к изготовлению ротора и сердечника статора. Улучшения гибридной системы могут быть достигнуты за счет применения передовых стратегий векторного управления, оптимизации воздушного зазора, конструкции с наклонными зубцами и точного размещения ферромагнитных вставок для локального повышения проницаемости и подавления пульсаций крутящего момента. Такие гибридные подходы представляют собой компромисс между легкой конструкцией и функциональной производительностью, хотя полностью ферромагнитные сердечники остаются стандартом для приложений с высокой мощностью и низкими пульсациями.

На основе изученного материала была составлена таблица 1 в которой представлены параметры БДПТ влияющие на удельную мощность двигателя. Параметры разбиты на 2 группы в зависимости от степени влияния.

Таблица 1 – Параметры влияющие на удельную мощность БДПТ

№	Наименование параметра	Условное обозначение	Рекомендации по оптимизации
Параметры, обладающие сильным влиянием на удельную мощность БДПТ			
1	Ток статора	I_c	Оптимальное значение определяется по формуле 5
2	Модуль вектора потокосцепления магнитов ротора с фазами статора	Ψ_f	Прямая зависимость с удельной мощностью. Для повышения данного параметра необходимо оптимизировать систему управления
3	Активное сопротивление фазы статорной обмотки	$R_{\text{ст}}$	Обратная зависимость с удельной мощности. Для понижения необходимо обеспечить режим работы при которых значение тепловых потерь будет минимальным
4	Число витков каждой обмотки	N	Оптимальное число витков определяется балансом между необходимыми характеристиками (моментом, скоростью, мощностью) и техническими возможностями системы управления питанием и охлаждения.
5	Сечение витка	q	Повышение в сечения витка приводит к снижению сопротивления фазы и уменьшению тепловых потерь. Однако сокращает возможное число витков каждой обмотки. Оптимальное значение

			определяется в ходе моделирования в специализированных ПО.
6	Материала статора	ρ_c	Оптимальным вариантом будет применение ферромагнитных материалов с
7	Материала магнитов	ρ_m	Оптимальным вариантом будет применение гибрида ферромагнитных с полимерными материалами для понижения массы с сохранением мощности БДПТ.
8	Наружный диаметр статора	D_a	Прямая зависимость с удельной мощностью. Повышение размеров статора приводит к повышению мощности, однако данные размеры ограничены изделием, в которое будет устанавливаться БДПТ.
9	Наружный диаметр двигателя	D_n	Прямая зависимость с удельной мощностью. Повышение размеров двигателя приводит к повышению мощности, однако данные размеры ограничены изделием, в которое будет устанавливаться БДПТ.
Параметры, обладающие слабым влиянием на значение удельной мощности БДПТ			
10	Постоянный компонент момента трения	k_1	Обратная зависимость с удельной мощностью. Для понижения необходимо применять качественные подшипники, смазочные материалы и методы обработки поверхностей трущихся деталей.
11	Коэффициент пропорциональности динамического компонента момента трения	k_2	Обратная зависимость с удельной мощностью. Для понижения необходимо применять качественные подшипники, смазочные материалы и методы обработки поверхностей трущихся деталей.
12	Число пар полюсов	p	выбор оптимального числа пар полюсов зависит влияет на отношение скорости вращения двигателя к крутящему моменту. Выбор оптимального значения зависит от конкретных требований: необходим ли высокий крутящий момент на низких оборотах или важнее обеспечить высокую скорость вращения.

Заключение.

Высокая удельная мощность БДПТ определило применение данных двигателей во множестве отраслях машиностроения. В данной статье были разобраны основные параметры, влияющие на значение удельной мощности БДПТ и по каждому параметру были даны рекомендации направленные на повышение значения удельной мощности.

Данное исследование будет продолжено в виде создания модели малоразмерного БДПТ для с повышенной удельной мощностью в специализированном программном обеспечении Ansys Motor-Cad с учётом теоретических зависимостей, описанных в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Putranto R. Design and implementation of 2 kW BLDC motor for e-scooter electric vehicle according to Indonesian bicycle conversion standards / R. Putranto, R. Sukino // Journal Geuthee of Engineering and Energy (JOGE). – 2025. – № 1. – С. 8–16.
2. Mandasari D. Electric boat propulsion with IPM BLDC motors: Performance and efficiency analysis / D. Mandasari, B. Sudiarto, L. Amelia, C. Nandar // Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi. – 2024. – № 2. – С. 84–92.
3. Dewi M. Design and Optimization of Brushless DC Motor for Electric Boat Thruster / M. Dewi, Y. Katri, A. Lia, A. Amiruddin, D. Endra, F. Faisal, N. Cuk // Evergreen Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy. – 2023. – № 3. – С. 1928–1937.

4. Fu Y. BLDC motors: Optimal propulsion for multirotor drones / Y. Fu, Z. Chen, E. Liu, Y. Cao // *Applied and Computational Engineering*. – 2025. – № 1. – С. 168–172.
5. Özüpak Y. Investigation of the Effect of Design Parameters of Small Brushless DC Motors on Motor Performance by Finite Element Method / Y. Özüpak // *Brilliant Engineering*. – 2022. – № 3. – С. 1–6.
6. Luo H. Simulation Research on Brushless DC Motor of Electric Car / H. Luo, J. Cao, Z. Wu, C. Yang, Y. Zheng // *Advances in Mechanical Engineering, Energy Science and Environment Engineering: Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, Energy Science and Environment Engineering*. – 2012. – № 3 – С. 120–124.
7. Eichler J. BLDC motor analysis in software ANSYS Electronics / J. Eichler, T. Zvolský // *Proceedings of the 2024 International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications*. – 2024. – № 1. – С. 35–38.
8. Ferdianto F. Performance Analysis of Permanent Magnet BLDC Motor for Reducing Cogging Torque Using Taguchi Method / F. Ferdianto, G. Fatwa, I. Aja // *ELKHA: Jurnal Teknik Elektro*. – 2024. – № 1. – С. 28–35.
9. Mahmud M. Control BLDC motor speed using PID controller / M. Mahmud, S.A. Motakabber, A. Zahirul Alam // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. – 2020. – №3. – С. 477–481.
10. Chuanhui Z. Design and Simulation Analysis of Stator Slots for Small Power Permanent Magnet Brushless DC Motors / Z. Chuanhui, L. Rujie, M. Congli, P. Tao, Z. Guoqin // *International Transactions on Electrical Energy Systems*. – 2023. – № 1. – С. 1–19.
11. Anshory I. BLDC motor: Modeling and optimization speed control using firefly algorithm / I. Anshory, D. Hadidjaja, R. Jakaria // *Dinamik*. – 2020. – № 1. – С. 51–58.
12. Trofimov P. BLDC motor simulation model with configurable BEMF in Julia / P. Trofimov, E. Sokol // *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series New solutions in modern technologies*. – 2025. – № 1. – С. 62–69.
13. Liu Z.-S. Design and research of permanent magnet brushless DC direct drive hub motor / Z.-S. Liu // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – № 1. – С. 15–22. DOI: 10.1088/1757-899X/644/1/012009.
14. Prakash A. Torque enhancement of BLDC motor considering iron loss: Modeling and compensation approach / A. Prakash, V. Devara, A. Ranjan, U. Muduli // *Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*. – 2024. – № 1. – С. 1–6.
15. Kang S.-J. Thermal and flow analysis of outer-rotor type BLDC motor with cooling blades / S.-J. Kang, S.-M. Wang, H.-K. Shim, K.-S. Lee // *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*. – 2007. – № 9. – С. 772–779.
16. Ale B. Modeling and performance analysis of an in-wheel permanent magnet brushless DC (PM BLDC) motor in MATLAB / B. Ale // *Proceedings of the 2022 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications*. – 2022. – С. 321–326.
17. Kahar M. Improvement of electromagnetic torque of BLDC motor for electrical cutter application / M. Kahar, R. O. Raja Nor Firdaus, A. Khamis, K. Abdulkarim, F. Azhar, A. Ghani, R. Rejab // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. – 2024. – № 3. – С. 1412–1425.
18. Gaddam M. Conversion of an existing 3-phase BLDC hub motor to a 6-phase BLDC hub motor and their performance analysis for EV application / M. Gaddam, C. Muktevi, B. Mangu // *International Journal of Electrical and Electronics Research*. – 2024. – № 3. – С. 981–990.
19. Holambe P. Design of internal permanent magnet brushless DC motor using ANSYS / P. Holambe // *Proceedings of the 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques*. – 2016. – С. 4326–4330.
20. Özüpak Y. Efficiency analysis of BLDC motor for variable magnetic field / Y. Özüpak // *MANAS Journal of Engineering*. – 2022. – № 2. – С. 181–188.
21. Mandasari D. Electric boat propulsion with IPM BLDC motors: Performance and efficiency analysis / D. Mandasari, B. Sudiarto, L. Amelia, C. Nandar // *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*. – 2024. – № 2. – С. 84–92.
22. Celtekliligil U. Modeling, simulation and analysis of bipolar driven BLDC motor / U. Celtekliligil, M. Çavdar // *Proceedings of the 2021 IEEE 6th International Forum on Research and Technology for Society and Industry*. – 2021. – С. 334–339.
23. Flah A. Overview on BLAC and BLDC motors: designs and mathematical modeling / A. Flah, L. Sbata // *International Journal of Powertrains*. – 2021. – № 3. – С. 195–215.
24. Zawarczynski L. Parametric identification of nonlinear and linear mathematical models of the BLDC motor / L. Zawarczynski // *Pomiary Automatyka Robotyka*. – 2024. – № 2. – С. 79–86.
25. Rama J.V.G. Power quality improvement in BLDC motor drive using PFC converter / J.V.G. Rama, A.N.V.J. Raja, P. Prasad, R. Illa, B. Muthuvel // *The Scientific Temper*. – 2023. – № 4. – С. 1557–1562.
26. Dusane P. Simulation of BLDC hub motor in ANSYS - Maxwell / P. Dusane // *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*. – 2016. – С. 1–5.
27. Tosun O. The design, optimization, and experimental study of hub and axial flux BLDC motor under operating conditions for light electric vehicles / O. Tosun, K. Toker, N. F. Serteller, V. Topuz // *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. – 2023. – № 3. – С. 272–282.
28. Ziemiański D. Analysis of Stator Material Influence on BLDC Motor Performance / D. Ziemiański, G. Chwalik, G. Dudzik // *Materials*. – 2025. – № 19. – С. 10–15.

Кудрявцев Роман Алексеевич

РГАТУ имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск
Студент кафедры мехатроники, механики и
робототехники
152934, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, д.
53
E-mail: roman8kudr@gmail.com

Живанский Иван Данилович

РГАТУ имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск
Студент кафедры электротехники и
программируемой радиоэлектроники
152934, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, д.
53
E-mail: ivanzivanskij@gmail.com

Блинов Илья Сергеевич

РГАТУ имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск
Аспирант кафедры электротехники и
программируемой радиоэлектроники
152934, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, д.
53
E-mail: ilya.blinov.1998@mail.ru

Елисеичев Евгений Александрович

РГАТУ имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск
Доцент кафедры электротехники и программируемой
радиоэлектроники
152934, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, д.
53
E-mail: EvgenijEliseichev@yandex.ru

Воробьев Павел Сергеевич

РГАТУ имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск
Аспирант кафедры инновационного машиностроения
152934, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53
E-mail: vorps98@yandex.ru

KUDRYAVTSEV R.A., ZHIVANSKY I.D., ELISEICHEV E.A., BLINOV I.S., VOROBYOV P.S.

DETERMINATION OF PARAMETERS AND ASSESSMENT OF THEIR INFLUENCE ON THE SPECIFIC POWER OF DC BLUETOOTH MOTORS

Abstract. *Brushless DC motors have become widely used due to their improved mechanical characteristics compared to other types of electric motors. One of the key characteristics of DC motors is their specific power, which reflects the ratio of mechanical power to the motors mass. This characteristic is particularly important for motors used in small unmanned aerial vehicles. This article presents an analysis of the scientific literature to determine the relationship between the specific power of a brushless DC motor and its technical parameters. Based on the analysis, n key parameters influencing specific power were identified. These parameters were grouped according to their degree of influence. Based on the analysis, recommendations were provided for optimizing the parameters to increase specific power.*

Keywords: *brushless DC motor, specific power, data analysis, DC motor parameters.*

BIBLIOGRAPHY

1. Putranto R. Design and implementation of 2 kW BLDC motor for e-scooter electric vehicle according to Indonesian bicycle conversion standards / R. Putranto, R. Sukino // Journal Geuthee of Engineering and Energy (JOGE). – 2025. – № 1. – С. 8–16.
2. Mandasari D. Electric boat propulsion with IPM BLDC motors: Performance and efficiency analysis / D. Mandasari, B. Sudiarto, L. Amelia, C. Nandar // Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi. – 2024. – № 2. – С. 84–92.
3. Dewi M. Design and Optimization of Brushless DC Motor for Electric Boat Thruster / M. Dewi, Y. Katri, A. Lia, A. Amiruddin, D. Endra, F. Faisal, N. Cuk // Evergreen Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy. – 2023. – № 3. – С. 1928–1937.
4. Fu Y. BLDC motors: Optimal propulsion for multirotor drones / Y. Fu, Z. Chen, E. Liu, Y. Cao // Applied and Computational Engineering. – 2025. – № 1. – С. 168–172.
5. Özüpak Y. Investigation of the Effect of Design Parameters of Small Brushless DC Motors on Motor Performance by Finite Element Method / Y. Özüpak // Brilliant Engineering. – 2022. – № 3. – С. 1–6.
6. Luo H. Simulation Research on Brushless DC Motor of Electric Car / H. Luo, J. Cao, Z. Wu, C. Yang, Y. Zheng // Advances in Mechanical Engineering, Energy Science and Environment Engineering: Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, Energy Science and Environment Engineering. – 2012. – № 3 – С. 120–124.
7. Eichler J. BLDC motor analysis in software ANSYS Electronics / J. Eichler, T. Zvolský // Proceedings of the 2024 International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications. – 2024. – № 1. – С. 35–38.
8. Ferdianto F. Performance Analysis of Permanent Magnet BLDC Motor for Reducing Cogging Torque Using Taguchi Method / F. Ferdianto, G. Fatwa, I. Aja // ELKHA: Jurnal Teknik Elektro. – 2024. – № 1. – С. 28–35.
9. Mahmud M. Control BLDC motor speed using PID controller / M. Mahmud, S.A. Motakabber, A. Zahirul Alam // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2020. – №3. – С. 477–481.
10. Chuanhui Z. Design and Simulation Analysis of Stator Slots for Small Power Permanent Magnet Brushless DC Motors / Z. Chuanhui, L. Rujie, M. Congli, P. Tao, Z. Guoqin // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2023. – № 1. – С. 1–19.
11. Anshory I. BLDC motor: Modeling and optimization speed control using firefly algorithm / I. Anshory, D. Hadidjaja, R. Jakaria // Dinamik. – 2020. – № 1. – С. 51–58.
12. Trofimov P. BLDC motor simulation model with configurable BEMF in Julia / P. Trofimov, E. Sokol // Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series New solutions in modern technologies. – 2025. – № 1. – С. 62–69.

13. Liu Z.-S. Design and research of permanent magnet brushless DC direct drive hub motor / Z.-S. Liu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – № 1. – С. 15-22. DOI: 10.1088/1757-899X/644/1/012009.
14. Prakash A. Torque enhancement of BLDC motor considering iron loss: Modeling and compensation approach / A. Prakash, V. Devara, A. Ranjan, U. Muduli // Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems. – 2024. – № 1. – С. 1–6.
15. Kang S.-J. Thermal and flow analysis of outer-rotor type BLDC motor with cooling blades / S.-J. Kang, S.-M. Wang, H.-K. Shim, K.-S. Lee // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B. – 2007. – № 9. – С. 772–779.
16. Ale B. Modeling and performance analysis of an in-wheel permanent magnet brushless DC (PM BLDC) motor in MATLAB / B. Ale // Proceedings of the 2022 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications – 2022. – С. 321–326.
17. Kahar M. Improvement of electromagnetic torque of BLDC motor for electrical cutter application / M. Kahar, R. O. Raja Nor Firdaus, A. Khamis, K. Abdulkarim, F. Azhar, A. Ghani, R. Rejab // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2024. – № 3. – С. 1412–1425.
18. Gaddam M. Conversion of an existing 3-phase BLDC hub motor to a 6-phase BLDC hub motor and their performance analysis for EV application / M. Gaddam, C. Muktevi, B. Mangu // International Journal of Electrical and Electronics Research. – 2024. – № 3. – С. 981–990.
19. Holambe P. Design of internal permanent magnet brushless DC motor using ANSYS / P. Holambe // Proceedings of the 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques. – 2016. – С. 4326–4330.
20. Özüpak Y. Efficiency analysis of BLDC motor for variable magnetic field / Y. Özüpak // MANAS Journal of Engineering. – 2022. – № 2. – С. 181–188.
21. Mandasari D. Electric boat propulsion with IPM BLDC motors: Performance and efficiency analysis / D. Mandasari, B. Sudiarto, L. Amelia, C. Nandar // Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi. – 2024. – № 2. – С. 84–92.
22. Celtekliligil U. Modeling, simulation and analysis of bipolar driven BLDC motor / U. Celtekliligil, M. Çavdar // Proceedings of the 2021 IEEE 6th International Forum on Research and Technology for Society and Industry. – 2021. – С. 334–339.
23. Flah A. Overview on BLAC and BLDC motors: designs and mathematical modeling / A. Flah, L. Sbita // International Journal of Powertrains. – 2021. – № 3. – С. 195–215.
24. Zawarczynski L. Parametric identification of nonlinear and linear mathematical models of the BLDC motor / L. Zawarczynski // Pomiar Automatyka Robotyka. – 2024. – № 2. – С. 79–86.
25. Rama J.V.G. Power quality improvement in BLDC motor drive using PFC converter / J.V.G. Rama, A.N.V.J. Raja, P. Prasad, R. Illa, B. Muthuvel // The Scientific Temper. – 2023. – № 4. – С. 1557–1562.
26. Dusane P. Simulation of BLDC hub motor in ANSYS - Maxwell / P. Dusane // Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems. – 2016. – С. 1–5.
27. Tosun O. The design, optimization, and experimental study of hub and axial flux BLDC motor under operating conditions for light electric vehicles / O. Tosun, K. Toker, N. F. Serteller, V. Topuz // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. – 2023. – № 3. – С. 272–282.
28. Ziemiański D. Analysis of Stator Material Influence on BLDC Motor Performance / D. Ziemiański, G. Chwalik, G. Dudzik // Materials. – 2025. – № 19. – С. 10–15.

Kudryavtsev Roman Alekseevich

P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk
Student at the Department of Mechatronics, Mechanics and robotics
152934, Russian Federation, Yaroslavl Region, Rybinsk, Pushkin Str., b. 53
E-mail: roman8kudr@gmail.com

Blinov Ilya Sergeevich

P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk
Postgraduate Student, Department of Electrical Engineering and Programmable Radioelectronics
152934, Russian Federation, Yaroslavl Region, Rybinsk, Pushkin Str., b. 53
Email: ilya.blinov.1998@mail.ru

Vorobiev Pavel Sergeevich

P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk
Postgraduate student of the Department of Innovative Mechanical Engineering
152934, Russian Federation, Yaroslavl Region, Rybinsk, Pushkin Str., b. 53
E-mail: vorps98@yandex.ru

Zhivansky Ivan Daniilovich

P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk
Student, Department of Electrical Engineering and Programmable Radioelectronics
152934, Russian Federation, Yaroslavl Region, Rybinsk, Pushkin Str., b. 53
E-mail: ivanzivanskij@gmail.com

Eliseichev Evgeny Aleksandrovich

P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk
Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Programmable Radioelectronics
152934, Russian Federation, Yaroslavl Region, Rybinsk, Pushkin Str., b. 53
Email: EvgenijEliseichev@yandex.ru

ГРИБАНОВ Е.Н., ИВАНОВ Р.Е., КОРОСТЕЛЕВ Д.А., ТУРБИН Н.Е.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ РЕЗИСТИВНЫХ СЕНСОРОВ В РОБОТОТЕХНИКЕ: КОРРЕЛЯЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Аннотация. Работа направлена на решение задачи разработки новых материалов для сенсоров в робототехнике и автоматизации. Установлены корреляции между технологическими режимами синтеза, морфологией и электрическими свойствами пористого кремния – перспективной основы для миниатюрных химических сенсоров. Образцы получены методом электрохимического анодирования кремниевых пластин в растворе HF/HNO_3 /глицерин с варьированием времени травления (15-45 с). Показано, что поверхностная проводимость зависит от однородности и геометрии нанопор (диаметр 50-200 нм, глубина до 50 нм). Оптимизация процесса за счет комбинации 30-секундного травления с ультразвуковой обработкой позволила увеличить проводимость на порядок за счет формирования структуры с низкой шероховатостью (~10 нм). Анализ вольт-амперных характеристик с использованием модели Фаулера–Нордхейма и теории p-n переходов выявил доминирование туннельного механизма переноса в области низких напряжений и смешанного механизма в области высоких. Определены технологические параметры, обеспечивающие воспроизводимое изготовление чувствительных элементов с заданными электрическими свойствами, что необходимо для их применения в качестве базового компонента в резистивных датчиках для автономных роботизированных систем.

Ключевые слова: пористый кремний, вольт-амперная характеристика, проводимость, анодирование, химические сенсоры.

Введение.

Пористый кремний (ПК) представляет собой перспективный материал для создания нового поколения высокочувствительных, миниатюрных и энергоэффективных сенсоров, важных для развития робототехники, мехатроники и систем автоматизации. Его применимость обусловлена уникальным сочетанием физико-химических свойств, высокоразвитой поверхностью (до $800 \text{ м}^2/\text{см}^3$), инертностью и биосовместимостью [1]. Пористый кремний является основой для создания интегрированных сенсорных узлов типа «лаборатория-на-чипе». Например, он находит широкое применение в качестве газовых сенсоров [2, 3], биомаркеров [4, 5], в микроэлектронике [6, 7] и солнечной энергетике [8] благодаря возможности контроля оптических (фотолюминисценция) и электрических (поверхностная проводимость) свойств материала, варьируя параметры его структуры на наноуровне – пористость, диаметр и глубина пор [9].

Применение ПК в химической сенсорике и робототехнике имеет особую перспективу из-за разнообразия подходов к модификации поверхности материала, направленной на получение селективного слоя с различной химической природой. Полупроводниковые сенсоры на основе пористого кремния отличаются своей простотой и низкой себестоимостью производства, что в сочетании с достаточной точностью и чувствительностью может быть использовано, например, для автоматизации и проведения скринингового анализа [1]. Одна из основных проблем при использовании сенсоров на основе пористого кремния в практике химического анализа это низкая воспроизводимость его электрических свойств, определяемых геометрическими параметрами структуры поверхности материала, которые зависят от условий синтеза и параметров протекания химико-технологического процесса получения пористого кремния. Возникают сложности при стабилизации и управлении чувствительностью сенсора.

Для получения пористого кремния наиболее широко применяют лазерное и газофазное травление, а также металлстимулированное и химическое травление [16-19]. Наибольшей эффективностью и простотой характеризуется метод анодирования (электрохимического травления), который позволяет контролировать геометрию пор, варьируя параметры получения (плотность тока, состав травителя, время травления), что особенно важно для применения ПК в качестве сенсорной подложки.

В ряде работ [10-13] изучено изменение морфологии поверхности пористого кремния при варьировании параметров электрохимического травления и состава травителя, также известны работы [14, 15], в которых рассматривают изменение проводимости образцов ПК в зависимости от геометрии пор. Установлено, что данные показатели во многом зависят от базовых характеристик кремния (удельное сопротивление, природа легирующих элементов и степень легирования, кристаллографическая ориентация), причём они влияют как на сам процесс порообразования, так и на электрические свойства получаемого материала.

Целью настоящей работы явился электрохимический синтез образцов пористого кремния, систематическое изучение морфологии их поверхности и электрических свойств в зависимости от параметров получения.

Материалы и методы.

В качестве исходных образцов использовали пластины монокристаллического кремния (легированные бором) дырочного типа проводимости, с удельным сопротивлением $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ориентированные в плоскости (100) (марка КДБ-1, 100). Предварительную обработку пластин проводили при воздействии ультразвука с использованием эквимольной смеси перекиси водорода и изопропанола, а далее раствора плавиковой кислоты.

Пористый кремний получали методом электрохимического травления при температуре окружающей среды $22 \pm 1^\circ \text{C}$ в растворе, содержащем концентрированные азотную кислоту, плавиковую кислоту и глицерин. Процесс проводили в потенциостатическом режиме с использованием двухэлектродной ячейки с графитом (ос.ч.) в качестве катода. Полученные образцы промывали бидистиллированной водой и сушили в потоке тёплого воздуха ($40\text{-}50^\circ \text{C}$).

Изучение морфологии поверхности проводили методом сканирующей зондовой микроскопии (микроскоп CMM-2000) в атомно-силовом режиме с использованием кантилеверов серии Etalon HA_C_DCP (радиус острия иглы $\sim 10 \text{ нм}$). Для изучения и фиксации вольт-амперных характеристик (ВАХ) пористого кремния собрана установка схема которой приведена на рисунке 1.

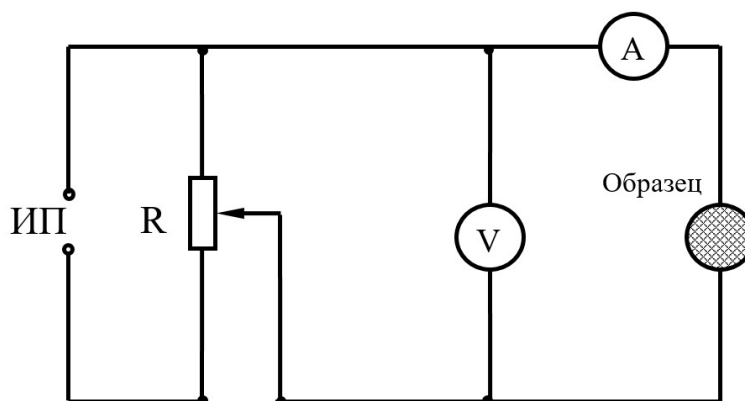


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для измерения электрических свойств образцов:
ИП – источник питания, R – переменный резистор (потенциометр), A – амперметр, V – вольтметр

В работе использовали источник тока Б5- 43А (максимальные выходные напряжение 10 В и сила тока 3 А), а также мультиметры APPA 103N и APPA 208. Для контроля точности измерения и учета сопротивления подводящих проводов вольт-амперная характеристика измерялась в два этапа: 1) при прямом контакте электродов (короткое замыкание), т.е. при отсутствии образца между контактами, ВАХ имела линейный вид; 2) при размещении исследуемого образца между двумя прижимными контактами, при этом подаваемое напряжение изменялось по следующей методике: сначала увеличение до некоторого предельного значения, затем плавное уменьшение до 0 В , смена полярности и повторение эксперимента 3 раза.

Результаты и обсуждение.

АСМ-изображения исходной поверхности кремния и его поверхности после предварительной обработки представлено на рисунке 2. Наблюдаемые островковые образования на рисунке 2а представляют собой диоксид кремния, удалению которого

способствует обработка образцов в растворе плавиковой кислоты. В результате удаления оксидного слоя структура поверхности приобретает слоистый характер, происходит локальное порообразование – углубления до 10 нм в форме окружности с диаметром ~100 нм. Среднее значение шероховатости R_a обработанного образца в 2 раза меньше исходного и составляет 5,2 нм, что соответствует 14 классу шероховатости.

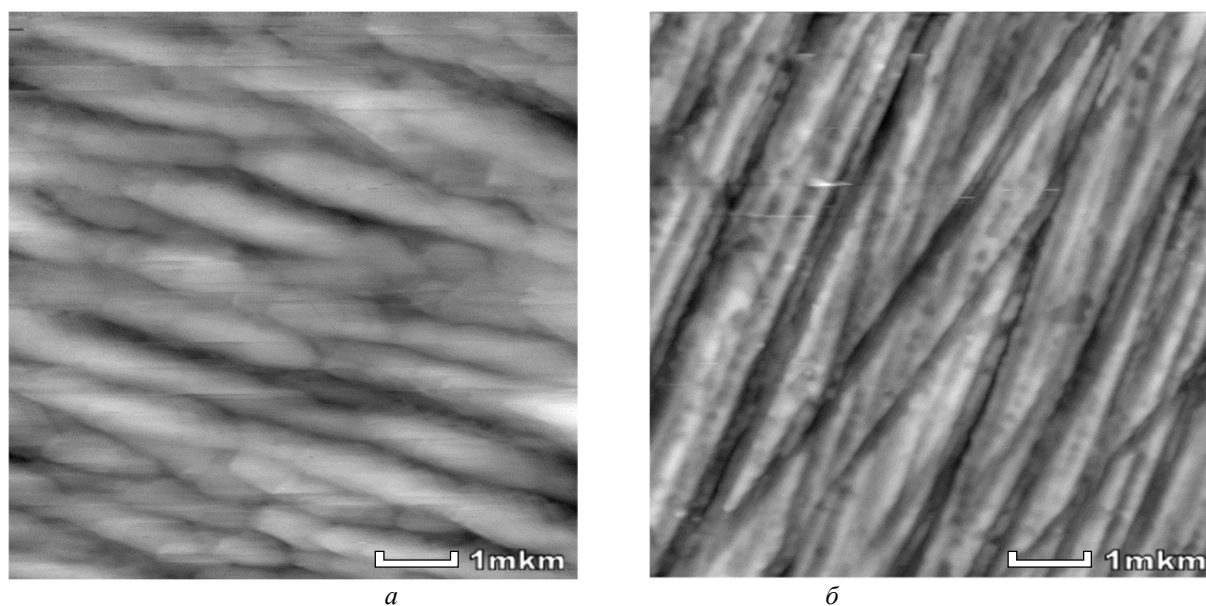


Рисунок 2 – АСМ-изображения исходной поверхности (а) и предварительно обработанной поверхности монокристалла кремния (б) (8,75 x 8,75 мкм)

На рисунке 3 приведены типичные вольтамперограммы исходных образцов монокристаллов кремния и предварительно обработанных. Ввиду достаточно высокого собственного удельного сопротивления пластин (1 Ом·см) поверхностная проводимость обоих типов образцов низкая и имеет слабо выраженный экспоненциальный характер.

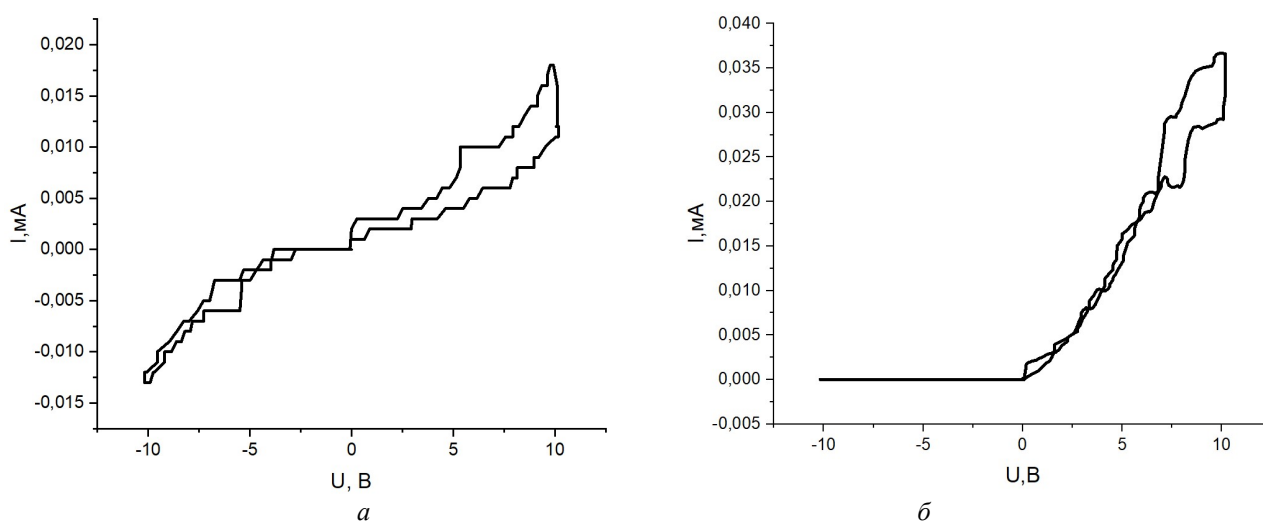


Рисунок 3 – Вольтамперограммы образцов КДБ до (а) и после (б) предварительной обработки

Точная численная оценка поверхностной проводимости исходного образца используемым методом измерения затруднена из-за присутствующего оксидного слоя и барьера, возникающего при контакте установки с поверхностью образцов (т.н. барьер Шоттки). После обработки произошла очистка поверхности от оксидного слоя, что приводит к улучшению контакта и росту проводимости.

Поверхностное сопротивление R_s можно оценить отношением собственного удельного сопротивления образца к его толщине, что составляет 29 Ом/см². Если рассматривать образцы с точки зрения приложения для сенсоров, то оценку электрических свойств можно делать по эффективной проводимости приповерхностного слоя (G , Сименс, См) между двумя контактами установки:

$$G = \frac{I(U)}{U}, \text{ где}$$

$I(U)$ – значение силы тока при приложенном напряжении, А; U – значение приложенного напряжения, В. Тогда $G_{исх} = 1,8 \text{ мкСм}$, а $G_{обр} = 3,6 \text{ мкСм}$ при $U = 10 \text{ В}$.

На рисунке 4 представлены типичные АСМ-изображения поверхности образцов пористого кремния, полученных при разном времени травления, состав раствора и режим анодирования оставались постоянными. В таблице 1 обобщены и приведены геометрические параметры поверхности полученных образцов.

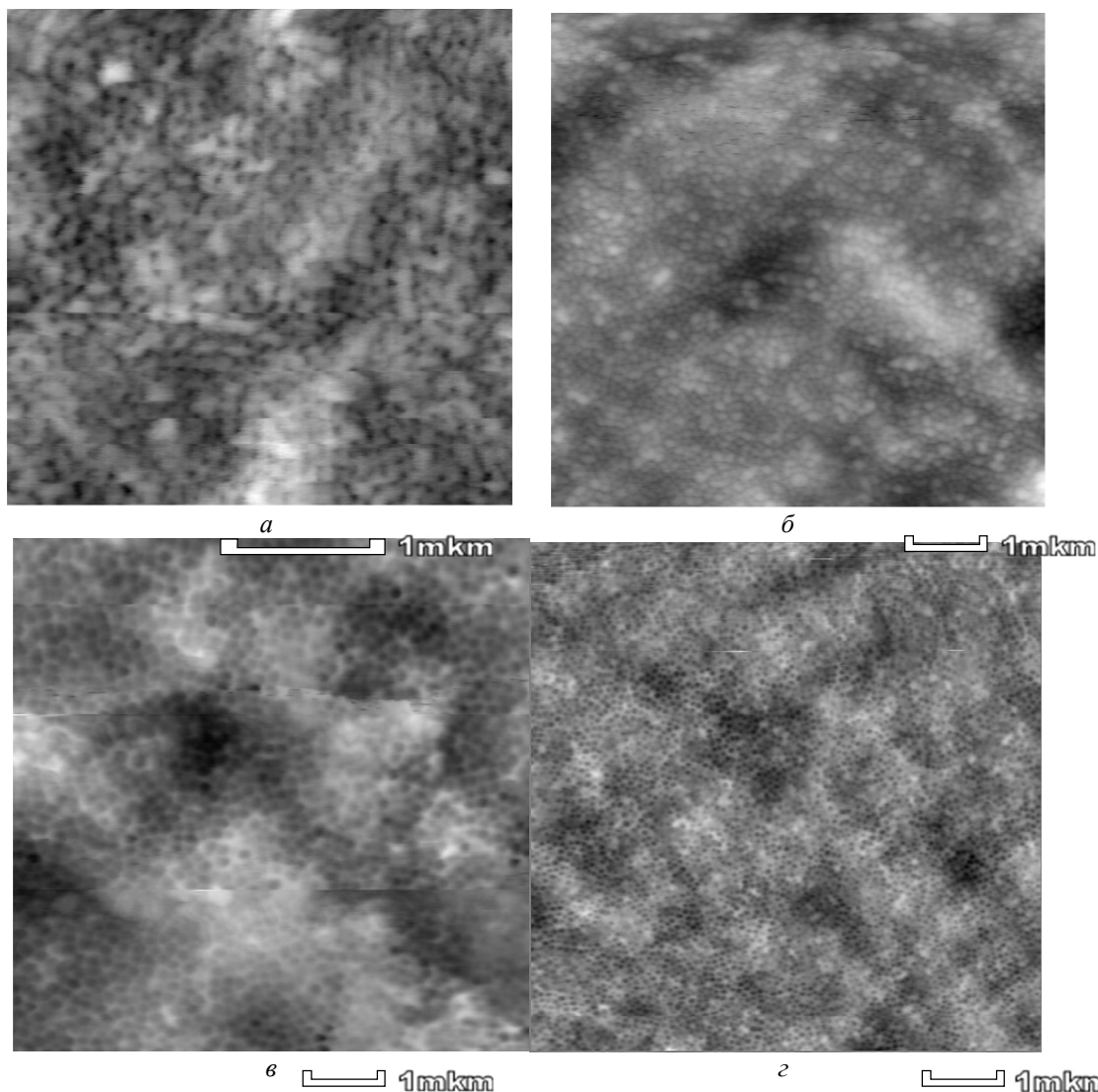


Рисунок 4 – АСМ-изображения образцов ПК марки КДБ №1 (а) (4,375 x 4,375 мкм), №2 (б), №3 (в), №4 (г) (8,75 x 8,75 мкм – остальные)

Обработка ультразвуком проводилась только при времени травления 30 секунд, так как полученные именно при этом времени образцы имеют наименьший диаметр пор, а их проводимость максимальна. Исходя из АСМ-изображений, можно сказать, что воздействие УЗ-излучения способствует образованию более гладкой, однородной и упорядоченной поверхности (рисунок 4г), поры при этом уменьшаются в диаметре и увеличиваются в глубину.

Таблица 1 - Геометрические параметры поверхности образцов пористого кремния в зависимости от времени травления

№ образца	Время травления, сек	Диаметр пор, нм	Глубина пор, нм	Среднее значение шероховатости (R_a), нм
1	15	100-150	<20	13,2
2	30	80-130	<20	20,5
3	45	100-200	20-50	35,1
4	30 + УЗ	50-100	<50 нм	10,2

На рисунке 5 приведены типичные вольтамперограммы образцов пористого кремния.

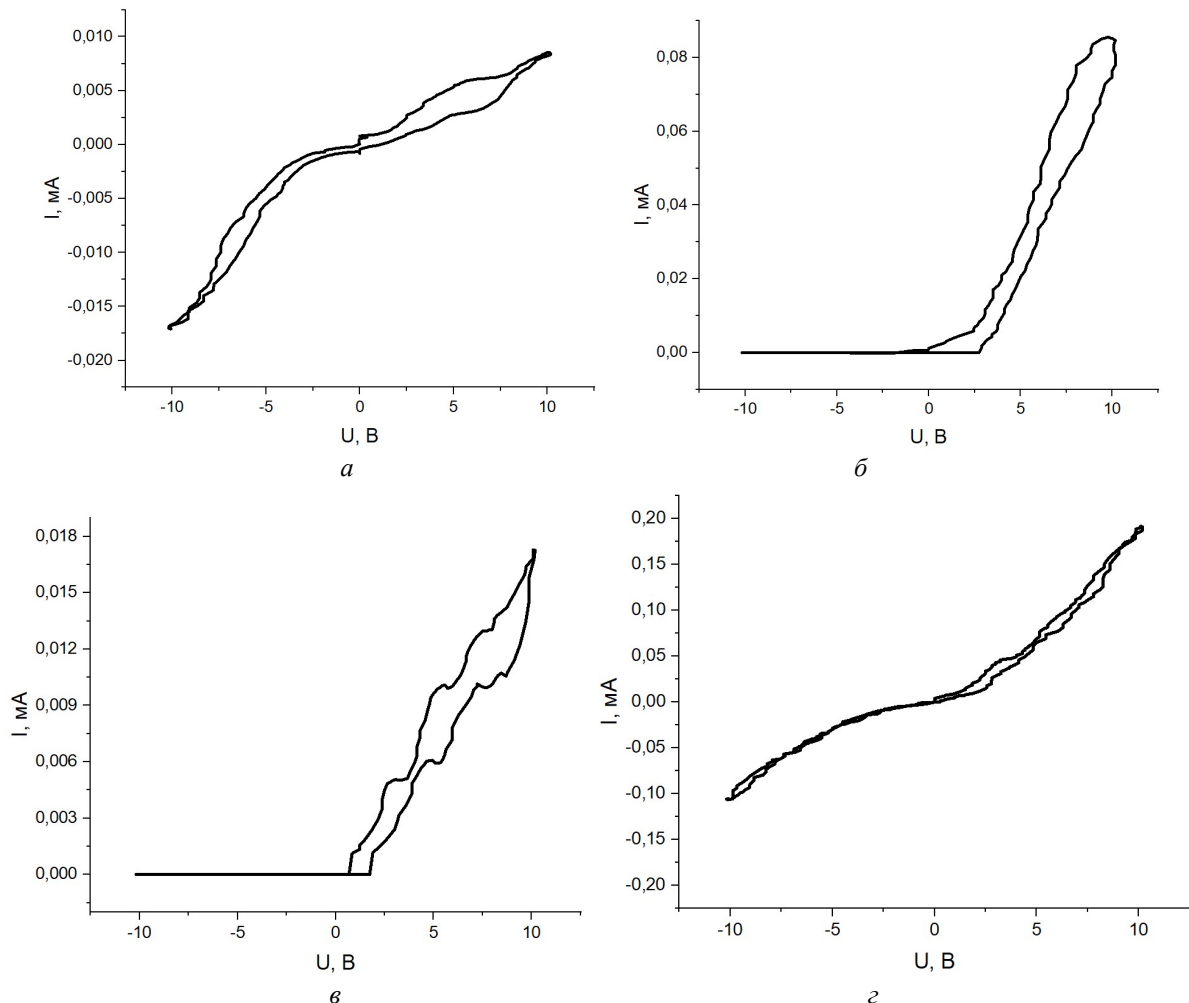


Рисунок 5 – Типичные вольтамперограммы образцов пористого кремния №1 (а), №2 (б), №3 (в) и №4 (г)

Таблица 2 - Изменение сопротивления получаемых образцов кремния (№1-4), а также

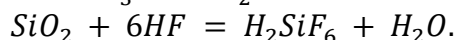
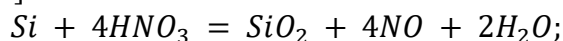
(при $U = 10$ В)	Исх.*	№0*	№1	№2	№3	№4
G, мкСм	1,8	3,6	1	8	1,8	20

*№0 – образец после предварительного травления; Исх. – монокристаллический кремний.

В таблице 2 приведены значения эффективной поверхностной проводимости образцов.

Проводимость образца № 1 оказалась хуже в сравнении с исходным монокристаллическим кремнием, что можно объяснить достаточно толстыми стенками пор (~100 нм), сравнимыми с размером самих пор, а также довольно низкой упорядоченностью полученной структуры, из-за чего перенос зарядов затруднен. Сопротивление образца №2 снизилось в сравнении с №1 и исходным, но остаётся низким относительно образца №4. Такое

поведение может быть обусловлено образованием более упорядоченной структуры, которая представлена порами с меньшим диаметром, однако на изображении присутствует большое число частиц, покрывающих поверхность. Это могут быть структуры диоксида кремния, сформированные в результате реакции кремния с азотной кислотой, но не прореагировавшие с плавиковой кислотой [20]:



Между данными частицами сохранились системы узких каналов шириной до 100 нм, что потенциально может быть причиной увеличения проводимости. Образец №3 аналогично первому показал ухудшение проводящих свойств, не смотря на высокую однородность пористой поверхности и относительно тонкие стенки пор. Вероятная причина связана с высоким средним значением шероховатости в сравнении с остальными образцами, а также наличием крупных углублений и возвышений на поверхности (ширина до 2 мкм). Образец №4 показывает улучшение проводимости в ~10 раз в сравнении с исходным, что, можно связать с высокой упорядоченностью структуры, малым диаметром пор (50-100 нм), и высокой однородностью покрывающих поверхность пор, а также низким значением шероховатости 10,2 нм.

Таким образом, увеличение проводимости можно объяснить тем, что развитая поверхность обеспечивает больший эффективный контакт с проводящими элементами, а структура пор позволяет организовать перенос носителей заряда, что снижает общее сопротивление материала [21].

Так как пористый кремний представляет собой сложную систему, где на электрические свойства одновременно влияют поры, дефекты, частицы оксида, ловушки и поверхностные состояния, то механизм протекания тока по такому материалу может отличаться в зависимости от приложенного напряжения и температуры. Можно выделить 2 механизма – барьерная проводимость (Шоттки и термоэмиссия), обусловленная наличием барьеров металл-пористый кремний и пористый кремний-монокристаллический кремний (при малой глубине пористого слоя) и туннелирование (прямое и по Фаулеру-Нордхейму), возникающее из-за тонких стенок пор, оксидных прослоек и локальных энергетических полей в порах.

Определить вклад барьерной проводимости можно путём определения характера зависимости « $|\ln(I/U^2)| - 1/U$ »: наличие прямой линии в каком-либо диапазоне напряжения говорит о механизме туннелирования по Фаулеру-Нордхейму.

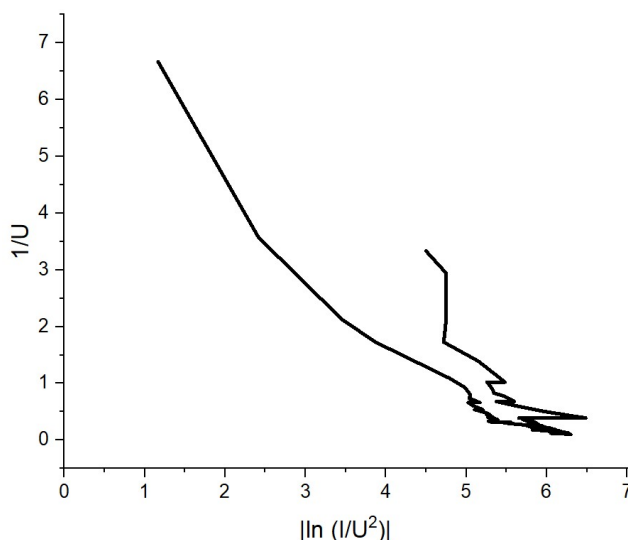


Рисунок 6 – График Фаулера-Нордхейма для образца №4

На рисунке 6 приведен график Фаулера-Нордхейма для образца №4 – на нем присутствует квазилинейный участок только в области малых напряжений, что указывает на доминирование туннелирования лишь в ограниченном диапазоне полей. При увеличении напряжения наблюдается заметное отклонение от линейности, что свидетельствует о переходе

к другому механизму транспорта зарядов (возможный вклад туннелирования через ловушки, термоэмиссии или ограничение тока последовательным сопротивлением пористого/монокристаллического кремния и контактов). Таким образом, туннелирование по Фаулеру-Нордхейму в исследуемых структурах реализуется только в узком диапазоне низких напряжений, тогда как при большем напряжении проводимость определяется иными процессами [22].

Для описания вольт-амперных характеристик полупроводниковых переходов традиционно используют уравнение Шокли, выведенное для идеального p -перехода при ряде упрощающих допущений. В реальных структурах эти допущения не выполняются, их учитывают с помощью коэффициента идеальности n :

$$I = I_0 \left(\exp \frac{q}{nkT} - 1 \right).$$

Величина n характеризует отклонение реальной вольт-амперной характеристики от идеальной: значения $n \approx 1$ соответствуют преимущественно диффузионному механизму переноса, $n \approx 2$ – генерации-рекомбинации в обеднённой области, $n \gg 2$ указывает на преобладание сложных механизмов переноса. На полулогарифмическом графике $\ln(I) - U$ экспоненциальная область ВАХ должна приближённо иметь прямолинейный вид.

В диапазоне напряжений 0,30-1,00 В при прямом измерении полулогарифмический график $\ln(I) - U$ демонстрирует квазилинейный рост, что позволяет оценить эффективный коэффициент идеальности диодного уравнения. По наклону зависимости $\ln(I)$ от U получено $n \approx 20$ ($T \approx 295$ К), т.е. преобладает сильно неидеальный механизм переноса заряда (комбинация туннелирования через неоднородные барьеры, проводимость через ловушки и ограничение тока последовательным сопротивлением структуры). В данном случае параметр n носит феноменологический характер, отражая существенное отклонение ВАХ от идеального диодного закона.

Для обратной ветви ВАХ в диапазоне 0,01-1,00 В по наклону зависимости $\ln(I) - U$ получен эффективный коэффициент идеальности $n \approx 45$. Такое значение указывает на преобладание сильно неидеальных механизмов переноса и эффект памяти структуры после приложенного высокого напряжения.

Выводы.

В работе изучена морфология поверхности и электрические свойства образцов пористого кремния, синтезированных методом электрохимического анодирования монокристаллического кремния при разном времени травления и обработке УЗ-облучением. По полученным вольт-амперным характеристикам проведена оценка величины эффективной проводимости приповерхностного слоя. Она при травлении в оптимальных условиях (30 секунд при воздействии УЗ-излучения) в 10 раз больше (20 мкСм) в сравнении с исходным образцом монокристаллического кремния (1,8 мкСм). Сделано предположение о том, что на поверхностную проводимость пористого кремния влияют толщина стенок между порами, однородность пористого слоя и шероховатость поверхности. По полученным вольт-амперным характеристикам методом Фаулера-Нордхейма и приближением уравнения Шокли проведен анализ механизма проводимости пористого кремния. Установлено, что из-за сложной иерархической структуры материала (поры, неоднородные барьеры, ловушки, дефекты) механизм протекания тока в пористом кремнии имеет смешанный характер и зависит от величины приложенного напряжения, а также особенностей структуры поверхности материала.

Практическая значимость полученных результатов заключается в их дальнейшем использовании для разработки компонентов робототехнических и мехатронных систем. Установленные количественные зависимости «параметры синтеза- морфология- проводимость» позволяют перейти к целенаправленному и воспроизводимому изготовлению чувствительных элементов на основе пористого кремния – резистивных химических датчиков, например, в системах автоматизированного экологического мониторинга, на производственных линиях или в составе искусственной сенсорной системы роботов. Таким образом, полученные данные развивают технологические основы интеграции миниатюрных,

чувствительных и стабильных сенсоров на основе пористого кремния в системы автоматизации и робототехники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства» (договор № 1072ГССС27/108645 от «17» октября 2025 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко А.В. Наноструктурированные плёнки меди на пористом кремнии: формирование, свойства и применение: монография / А.В. Бондаренко. – Минск: Бестпринт, 2019. – 134 с. – ISBN 978-985-6963-99-8.
2. Khaniye U. B.A., Sagidolda Y., Dikhanbaye U K.K., Tileu A.O., Ibraimo U M.K. High sensitive NH₃ sensor based on electrochemically etched porous silicon // Cogent Engineering. – 2020. – Vol. 7, № 1. – P. 1810880.
3. Harraz F.A., Ismail A.A., Bouzid H., Al-Sayari S.A., Al-Hajry A., Al-Assiri M.S. A capacitive chemical sensor based on porous silicon for detection of polar and non-polar organic solvents // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 307. – P. 704-711.
4. Морфология и свойства поверхности пористого кремния для адресной доставки лекарств / Спивак Ю.М., Белорус А.О., Селезнев Б.И., Мошников В.А. // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2015. – № 8 (91). – С. 77-80.
5. Спивак Ю.В., Мошников В.А., Леншин А.С. Пористый кремний и его применение в биомедицине [Электронный ресурс] // ResearchGate. – 2015. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/320244644_Poristyj_kremnij_i_ego_primenenie_v_biomedicine (дата обращения: 15.11.2026).
6. Gauthier G. и др. Porous silicon in microelectronics: from research to industry // ECS Transactions. – 2015. – Vol. 69, № 2. – P. 123-134.
7. Барышевская Е.Н. Применение кремния в микроэлектронике / Е.Н. Барышевская // Влияние науки на инновационное развитие: сб. статей междунар. науч.-практ. конф., Томск, 25 февр. 2016 г. / отв. ред. А.А. Сукиасян. – Томск: ООО «Аэтерна», 2016. – Ч. 3. – С. 57-58.
8. Latukhina N., Rogozin A., Puzyrnaya G., Lizunko Ua D., Gurto U A., I Uko U S. Efficient silicon solar cells for space and ground-based aircraft // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 104. – P. 157-161.
9. Lee S.H., Kang J.S., Kim D. Brief review: recent advances in porous silicon surface modification // Materials. – 2018. – Vol. 11, № 12. – P. 2557.
10. Леньшин А.С., Пешков Я.А., Черноусова О.В., Канныкин С.В., Гречкина М.В., Минаков Д.А., Золотухин Д.С., Агапов Б.Л. Изменение морфологии многослойного пористого кремния при ступенчатом уменьшении плотности тока травления // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2023. – Т. 16, № 3.1. – С. 100–105. – DOI: 10.18721/JPM.163.118.
11. Zhang Yu. и др. Morphology of porous silicon obtained by electrochemical etching with the addition of alcohols // Optik. – 2016. – Vol. 127, № 5. – P. 3009-3012.
12. Zhao M., McCormack A., Keswani M. The formation mechanism of gradient porous silicon in a non-contact electrochemical process // Journal of Materials Chemistry C. – 2016. – Vol. 4, № 19. – P. 4204-4210.
13. Kumar P., Huber P. Effect of Etching Parameter on Pore Size and Porosity of Electrochemically Formed Nanoporous Silicon // Journal of Nanomaterials. – 2007. – Vol. 2007. – P. 1-4.
14. Anooj E.S., Gangadhar Lekshmi, Sasikanth S.M., Shabna S. Electrical Properties Of Porous Silicon Prepared By Electrochemical Etching Technique // Journal of Nanomaterials. – 2019. – P. 1-10.
15. Azim-Araghi M.E., Ashrafabadi S., Kanjouri F. Electrical Behaviour of Nanostructured Porous Silicon // Acta Physica Polonica A. – 2012. – Vol. 122. – P. 170-173. – DOI: 10.12693/APhysPolA.122.170.
16. Юзова В.А., Левицкий А.А., Харлашин П.А. Развитие технологий и получение исследований пористого кремния // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2011. – Вып. 4, № 1. – С. 92-112.
17. Boughaba S., Wang K. Fabrication of porous silicon using a gas etching method // Thin Solid Films. – 2006. – Vol. 497. – P. 83-89.
18. Harb N.H., Mutlak F.A.-H. Production and characterization of porous silicon via laser-assisted etching: Effect of gamma irradiation // Optik. – 2021. – Vol. 246. – P. 167800. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.167800.
19. Nuraini A., O.I. Deep etching of silicon based on chemical etching using metals // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7, № 19. – P. 16665-16669.
20. Грибанов Е.Н., Горшков А.И., Иванов Р.Е., Данилевич Д.В. Контроль качества и геометрических параметров поверхности монокристаллов кремния методом атомно-силовой микроскопии на рабочих поверхностях мехатронных механизмов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 3. – С. 62-67.
21. Зимин С.П. Электрофизика пористого кремния и структур на его основе: дис. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.10 / Зимин Сергей Петрович. – СПб.: СПбГПУ, 2003. – 36 с.
22. Szentpáli B., Mohácsy T., Bársony I. Conduction mechanisms in porous Si LEDs // Current Applied Physics. – 2006. – Vol. 6, № 2. – P. 174-178.

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

Коростелев Дмитрий Александрович

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
студент
302026, Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95
E-mail: dimedrol85@list.ru

Иванов Роман Евгеньевич

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
студент
302026, Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95
E-mail: 777ivanov777@mail.ru

Турбин Никита Евгеньевич

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
студент
302026, Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95
E-mail: nikitka.turbin@inbox.ru

GRIBANOV E.N., IVANOV R.E., KOROSTELEV D.A., TURBIN N.E.

FORMATION OF POROUS SILICON FOR RESISTIVE SENSORS IN ROBOTICS: CORRELATION OF SURFACE MORPHOLOGY AND ELECTRICAL PROPERTIES

Abstract. *The work is aimed at solving the problem of developing new materials for sensors in robotics and automation. Correlations have been established between the technological modes of synthesis, the morphology, and the electrical properties of porous silicon, which is a promising basis for miniature chemical sensors. The samples were obtained by electrochemical anodizing of silicon wafers in a HF/HNO₃/glycerol solution, with varying etching times (15-45 s). It has been shown that the surface conductivity depends on the uniformity and geometry of the nanopores (diameter of 50-200 nm, depth of up to 50 nm). By optimizing the process through a combination of 30-s etching with ultrasonic treatment, the conductivity was increased by an order of magnitude due to the formation of a structure with low roughness (~10 nm). The analysis of the current-voltage characteristics using the Fowler-Nordheim model and the theory of p-n junctions revealed the dominance of the tunneling transport mechanism at low voltages and the mixed mechanism at high voltages. The technological parameters have been determined to ensure the reproducible production of sensitive elements with specified electrical properties, which is necessary for their use as a basic component in resistive sensors for autonomous robotic systems.*

Keywords: *porous silicon, volt-ampere characteristic, conductivity, anodization, chemical sensors.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bondarenko A.V. Nanostruktuirirovannye plenki medi na poristom kremnii: formirovanie, svoistva i primeneniye: monografiya / A.V. Bondarenko. – Minsk: Bestprint, 2019. – 134 s. – ISBN 978-985-6963-99-8.
2. Khaniye U. B.A., Sagidolda Y., Dikhanbaye U K.K., Tileu A.O., Ibraimo U M.K. High sensitive NH₃ sensor based on electrochemically etched porous silicon // Cogent Engineering. – 2020. – Vol. 7, № 1. – P. 1810880.
3. Harraz F.A., Ismail A.A., Bouzid H., Al-Sayari S.A., Al-Hajry A., Al-Assiri M.S. A capacitive chemical sensor based on porous silicon for detection of polar and non-polar organic solvents // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 307. – P. 704-711.
4. Morfologiya i svoistva poverkhnosti poristogo kremniia dlia adresnoi dostavki lekarstv / Spivak Yu.M., Belarus A.O., Seleznev B.I., Moshnikov V.A. // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. Iaroslava Mudrogo. – 2015. – № 8 (91). – S. 77-80.
5. Spivak Yu.V., Moshnikov V.A., Lenshin A.S. Poristy kremnii i ego primeneniye v biomeditsine [Elektronnyy resurs] // ResearchGate. – 2015. – Rezhim dostupa: https://www.researchgate.net/publication/320244644_Poristyj_kremnij_i_ego_primeneniye_v_biomedicine (data obrashcheniya: 19.01.2026).
6. Gauthier G. et al. Porous silicon in microelectronics: from research to industry // ECS Transactions. – 2015. – Vol. 69, № 2. – P. 123-134.
7. Baryshevskaya E.N. Primeneniye kremniia v mikroelektronike / E.N. Baryshevskaya // Vliianie nauki na innovatsionnoye razvitiye: sb. statei mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Tomsk, 25 febr. 2016 g. / otv. red. A.A. Sukiasian. – Tomsk: OOO «Aeterna», 2016. – Ch. 3. – S. 57-58.
8. Latukhina N., Rogozin A., Puzyrnaya G., Lizunko Ua D., Gurto U A., I Uko U S. Efficient silicon solar cells for space and ground-based aircraft // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 104. – P. 157-161.
9. Lee S.H., Kang J.S., Kim D. Brief review: recent advances in porous silicon surface modification // Materials. – 2018. – Vol. 11, № 12. – P. 2557.

10. Lenshin A.S., Peskok Ya.A., Chernousova O.V., Kannykin S.V., Grechkina M.V., Minakov D.A., Zolotukhin D.S., Agapov B.L. Izmenenie morfologii mnogoslainoi poristogo kremniia pri stupenchatom umenshenii plotnosti toka travleniia // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki. – 2023. – T. 16, № 3.1. – S. 100-105. – DOI: 10.18721/JPM.163.118.
11. Zhang Yu. et al. Morphology of porous silicon obtained by electrochemical etching with the addition of alcohols // Optik. – 2016. – Vol. 127, № 5. – P. 3009-3012.
12. Zhao M., McCormack A., Keswani M. The formation mechanism of gradient porous silicon in a non-contact electrochemical process // Journal of Materials Chemistry C. – 2016. – Vol. 4, № 19. – P. 4204-4210.
13. Kumar P., Huber P. Effect of Etching Parameter on Pore Size and Porosity of Electrochemically Formed Nanoporous Silicon // Journal of Nanomaterials. – 2007. – Vol. 2007. – P. 1-4.
14. Anooj E.S., Gangadhar Lekshmi, Sasikanth S.M., Shabna S. Electrical Properties Of Porous Silicon Prepared By Electrochemical Etching Technique // Journal of Nanomaterials. – 2019. – P. 1-10.
15. Azim-Araghi M.E., Ashrafabadi S., Kanjouri F. Electrical Behaviour of Nanostructured Porous Silicon // Acta Physica Polonica A. – 2012. – Vol. 122. – P. 170-173. – DOI: 10.12693/APhysPolA.122.170.
16. Iuzova V.A., Levitskii A.A., Kharlashin P.A. Razvitie tekhnologii i poluchenie issledovaniy poristogo kremniia // Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii. – 2011. – Vyp. 4, № 1. – S. 92-112.
17. Boughaba S., Wang K. Fabrication of porous silicon using a gas etching method // Thin Solid Films. – 2006. – Vol. 497. – P. 83-89.
18. Harb N.H., Mutlak F.A.-H. Production and characterization of porous silicon via laser-assisted etching: Effect of gamma irradiation // Optik. – 2021. – Vol. 246. – P. 167800. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.167800.
19. Nuraini A., O.I. Deep etching of silicon based on chemical etching using metals // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7, № 19. – P. 16665-16669.
20. Griбанov E.N., Gorshkov A.I., Ivanov R.E., Danilevich D.V. Kontrol kachestva i geometricheskikh parametrov poverkhnosti monokristallov kremniia metodom atomno-silovoi mikroskopii na rabochikh poverkhnostiakh mekhatronnykh mekhanizmov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2024. – № 3. – S. 62-67.
21. Zimin S.P. Elektrofizika poristogo kremniia i struktur na ego osnove: dis. d-ra fiz.-mat. nauk : 01.04.10 / Zimin Sergei Petrovich. – SPb.: SPbGPU, 2003. – 36 s.
22. Szentpáli B., Mohácsy T., Bársony I. Conduction mechanisms in porous Si LEDs // Current Applied Physics. – 2006. – Vol. 6, № 2. – P. 174-178.

Griбанov Evgeny Nikolaevich

Oryol State University
Candidate of Chemical Sciences, associate professor,
head of the department of Chemistry
302026, Russia, Oryol, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: gribanoven@gmail.com

Ivanov Roman Evgenievich

Orel State University,
student
Address: 302026, Russia, Oryol, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: 777ivanovr777@mail.ru

Korostelev Dmitry Alexandrovich

Orel State University,
student
Address: 302026, Russia, Oryol, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: dimedrol85@list.ru

Turbin Nikita Evgenievich

Orel State University,
student
Address: 302026, Russia, Oryol, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: nikitka.turbin@inbox.ru

© Грибанов Е.Н., Иванов Р.Е., Коростелев Д.А., Турбин Н.Е., 2026

БОНДАРЕНКО М.Э., РОДИЧЕВ А.Ю., ЯКОВЛЕНКО О.В., ГОРИН А.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С МНОГОСЛОЙНЫМИ АНТИФРИКЦИОННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Аннотация. В статье представлена научно обоснованная методология моделирования и прогнозирования процесса износа радиальных подшипников скольжения, оснащенных твердыми антифрикционными покрытиями. Предложенный подход базируется на использовании закона Арчарда для раздельного расчета интенсивности изнашивания защитного слоя и бронзового основания втулки. Весь жизненный цикл узла разделен на фазы, характеризующиеся специфическими параметрами трибологического контакта. Особое внимание уделено геометрической модели пересечения окружностей для определения площади фактического взаимодействия и перераспределения нагрузок между материалами по мере деградации покрытия. Результаты численного моделирования в среде MatLab подтверждают нелинейный характер изменения площадей контакта и пути трения. Разработанная методика предназначена для интеграции в системы предиктивного мониторинга, способные оценивать остаточный ресурс оборудования в режиме реального времени без использования датчиков прямого измерения износа.

Ключевые слова: подшипник скольжения, антифрикционное покрытие, прогнозирование, износ, остаточный ресурс.

Введение

Надежность и эксплуатационная готовность современного промышленного оборудования, особенно в энергетическом, нефтехимическом и транспортном секторах, критически зависят от технического состояния узлов трения. Радиальные подшипники скольжения являются фундаментальными компонентами крупногабаритных роторных машин, таких как паровые и газовые турбины, центробежные компрессоры, мощные электродвигатели и двигатели внутреннего сгорания.[1-4] В отличие от подшипников качения, ресурс которых часто ограничивается контактной усталостью металлов, радиальные подшипники скольжения проектируются для работы в условиях гидродинамической смазки, что теоретически предполагает бесконечный срок службы. Однако реальные условия эксплуатации, включающие пусковые и остановочные режимы, переменные нагрузки, загрязнение смазочного материала и температурные девиации, приводят к неизбежной деградации и постепенному расходованию ресурса. [5-8]

Методология мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса данных узлов трансформировалась из простых методов оценки вибрации в сложные многопараметрические системы, интегрирующие физико-математические модели трибологии и передовые алгоритмы глубокого обучения.[9-13] Современный подход к предиктивному обслуживанию требует не только фиксации текущего состояния, но и точного моделирования траектории износа, что позволяет оптимизировать межремонтные интервалы и предотвращать катастрофические отказы, способные нанести колоссальный экономический ущерб.[14-16].

Основная часть

Объектом исследования является подшипник скольжения балансира, совершающий качательные движения. Конструктивно деталь выполнена в виде бронзовой втулки, на рабочую поверхность которой нанесен антифрикционный слой. Схематичное изображение анализируемой модели приведено на рисунке 1.

В рассматриваемой системе ось с внешним диаметром d совершает возвратно-качательное движение внутри втулки с угловой скоростью ω . Конструкция подшипника включает бронзовый корпус диаметром $D_{\text{корп}}$ и нанесенное на него антифрикционное покрытие, образующее рабочий диаметр $D_{\text{покр}}$. Слой покрытия имеет толщину s , рассчитываемую по формуле

$$s = (D_{\text{корп}} - D_{\text{покр}}) / 2 \quad (1)$$

Базовый радиальный зазор в сопряжении определяется как:

$$h_0 = (D_{\text{п}} - d) / 2. \quad (2)$$

Износ рабочей поверхности подшипника скольжения в процессе эксплуатации может быть описана через массовые, объемные или линейные показатели интенсивности изнашивания. Для оценки объемного износа традиционно применяется закон Арчарда [9]:

$$V = K \frac{S_n P}{HB} \quad (3)$$

где K - безразмерный параметр, характеризующий износостойкость материала; S_n - общая дистанция трения; HB - твердость менее твердого элемента пары трения; P - суммарное усилие, действующее на узел.

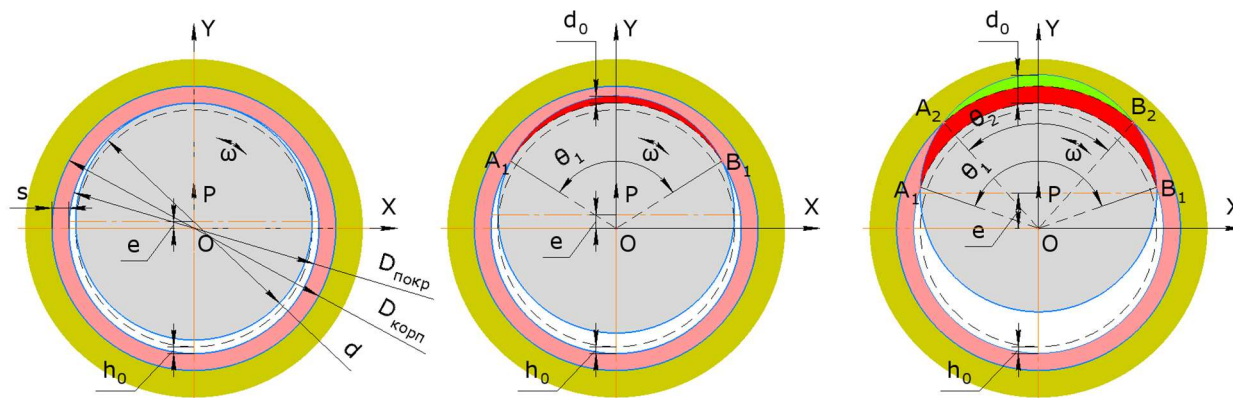


Рисунок 1 - Расчетная модель подшипника скольжения и процесс его износа

Для перехода к линейному износу d_0 достаточно соотнести полученный объем удаленного материала с площадью фактического взаимодействия поверхностей A_k :

$$d_0 = \frac{V}{A_k} \quad (4)$$

Для определения площади сопряжения A_k между осью и поверхностью подшипника при наличии износа использована модель, базирующаяся на анализе области пересечения двух окружностей. В рамках данной задачи приняты следующие допущения:

- элементы трибосистемы (вал, антифрикционный слой и основание) являются абсолютно жесткими, что позволяет пренебречь их упругими деформациями;
- контактные поверхности находятся в режиме установившегося износа (стадия притирки завершена).

Схематическое представление расчетной модели дано на рисунке 1. Внутренний контур втулки задается диаметром $D_{покp}$ (или $D_{корп}$ при полном истирании антифрикционного покрытия), а профиль оси - диаметром d . Положение оси определяется радиальным смещением e относительно геометрического центра втулки подшипника скольжения.

Динамика процесса изнашивания подразделяется на два этапа:

- Начальная фаза: происходит деградация исключительно мягкого антифрикционного покрытия.
- Вторая фаза: начинается при достижении валом поверхности бронзового основания. На данном этапе износ охватывает оба материала одновременно. Распределение зоны контакта между покрытием и основой описывается углами охвата θ_1 (суммарный) и θ_2 (непосредственно с бронзовым корпусом втулки).

Для нахождения углов контакта реализована процедура, отслеживающая положение центров окружностей для каждого шага смещения $e(i)$:

- Центр неподвижной втулки принимается за начало координат: $O[0, 0]$.
- Координаты центра подвижного вала O_2 определяются по вертикальной оси с учетом накопленного линейного износа d_0 и исходного эксцентриситета $y_2 = -(R_{покp} - r) - d_0$, где $R_{покp}$ и r - соответствующие радиусы элементов.

На основе методов аналитической геометрии вычисляется межосевое расстояние c :

$$c = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (5)$$

Для определения точек пересечения контуров вводятся вспомогательные параметры: f (дистанция от центра до хорды пересечения) и b (полухорда):

$$f = \frac{(R_{\text{покр}}^2 - r^2 + c^2)}{2c} \quad (6)$$

$$b = \sqrt{R_{\text{покр}}^2 - f^2} \quad (7)$$

Искомый угол контакта θ_1 представляет собой центральный угол, ограничивающий дугу взаимодействия. Его значение рассчитывается через скалярное произведение векторов v_1 и v_2 , направленных из центра O к точкам пересечения контуров A_1 и B_1 :

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{v_1 \cdot v_2}{|v_1| \cdot |v_2|}\right) \quad (8)$$

По аналогичной схеме вычисляется угол θ_2 при переходе контакта на материал основания. Результирующие значения площади контакта A_k для каждой зоны определяются через полученные угловые параметры:

$$A_{\text{покр}} = D_{\text{покр}} L \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{2\pi} \quad (9)$$

$$A_{\text{корп}} = D_{\text{корп}} L \frac{\theta_2}{2\pi} \quad (10)$$

Безразмерный коэффициент износа в формулах (3) и (4), равно как и коэффициент трения, устанавливаются опытным путем для определенных сочетаний материалов и условий их взаимодействия.

С целью верификации предложенного расчетного метода в данной работе исследуется покрытие на основе меди ПР-БрАЖНМц 8,5-1,5-5-1,5, детально описанное в источнике [17, 18]. На подложку из алюминиевой бронзы БрАЖ9-4, имеющую значительную толщину, нанесен антифрикционный слой толщиной $s = 1$ мм. Трибосопряжение функционирует в условиях граничной смазки. Физико-механические свойства материалов для указанного режима, а также конструктивные характеристики роторного узла систематизированы в таблице 1.

Таблица 1 - Физико-механические свойства материалов

Параметр	Обозначение	Значение
Безразмерный коэффициент износа покрытия	$K_{\text{покр}}$	2
Безразмерный коэффициент износа корпуса	$K_{\text{корп}}$	3
Твердость покрытия, кгс/мм ²	$HB_{\text{покр}}$	130
Твердость корпуса, кгс/мм ²	$HB_{\text{корп}}$	
Диаметр оси, мм	d	8
Диаметр втулки с антифрикционным покрытием, мм	$d_{\text{покр}}$	88,1
Диаметр втулки (корпус), мм	$d_{\text{корп}}$	90,1
Толщина покрытия, мм	s	1
Ширина подшипника скольжения, мм	L	80
Нагрузка на подшипник скольжения, Н	P	20000

Результаты и обсуждение

Численная реализация описанной износо-контактной задачи осуществлена в среде MatLab. На рисунке 2 продемонстрирована динамика трансформации углов охвата в зависимости от интенсивности углубления износа.

По мере приработки и углубления вала в материал втулки наблюдается закономерное увеличение площади взаимодействия. Стоит отметить, что данный процесс носит нелинейный характер, что обусловлено геометрической кривизной сопрягаемых поверхностей. Аналогичная нелинейность прослеживается и при распределении площади контакта между осью и двумя слоями - антифрикционным покрытием и бронзовым корпусом. Графическая интерпретация этих зависимостей приведена на рисунке 3.

Наличие двух различных материалов (покрытия и основания) приводит к дискретному перераспределению усилий в зоне контакта. В отличие от однородных подшипников, где

параметры изнашивания меняются монотонно, в данной системе наблюдается сложная динамика нагрузки на каждый из слоев. Предложенная расчетная методика позволяет интегрировать эти особенности в математическую модель, что критически важно для создания прецизионных систем мониторинга состояния узлов трения.

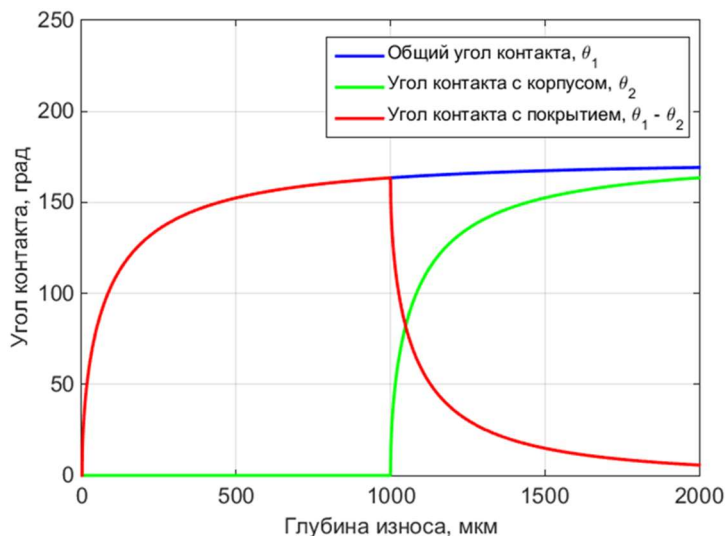


Рисунок 2 - Углы контактов трения при развитии износа

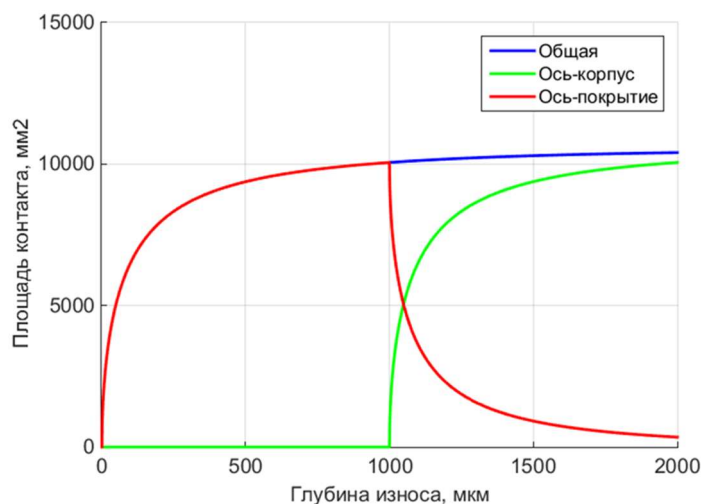


Рисунок 3 - Площади контактов трения при развитии износа

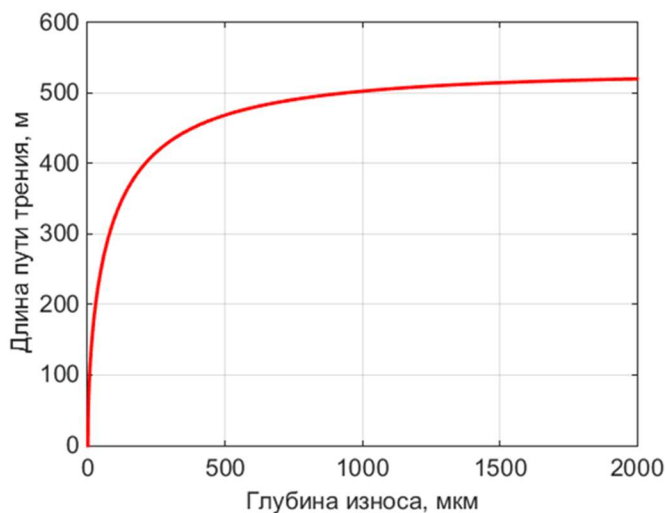


Рисунок 4 – Дискретный представление

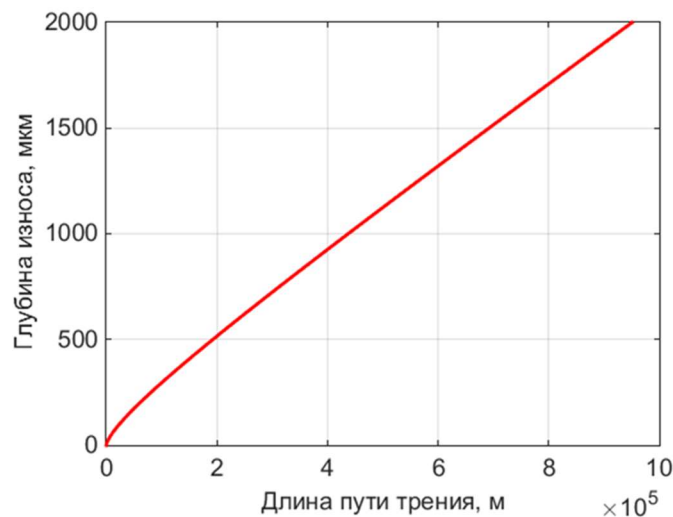


Рисунок 5 – Зависимость глубины износа от длины пройденного пути

Используя математический аппарат уравнений (1) и (2), была построена прогностическая модель деградации исследуемого подшипника с нанесенным антифрикционным слоем. Итоговая кривая, отражающая этот процесс, приведена на рисунке 4, которая отражает зависимость пройденного пути трения в подшипнике скольжения в дискретном представлении. И на рисунке 5 зависимость пройденного пути трения в подшипнике скольжения в суммарном представлении.

Заключение

Проведённое исследование демонстрирует комплексный подход к оценке износа подшипников скольжения, объединяющий математическое моделирование на основе уравнения Арчарда. В ходе исследования были получены следующие результаты:

- разработана и верифицирована комплексная методология, позволяющая моделировать износ многослойных подшипников скольжения с учетом перехода контакта от защитного слоя к основному материалу втулки;
- установлено, что процесс изменения площадей контакта и углов охвата носит выраженный нелинейный характер, обусловленный геометрией сопрягаемых поверхностей, что критически важно для точного расчета траектории износа;
- предложенная математическая модель позволяет учитывать дискретное перераспределение механических усилий в зоне трения при совместном истирании покрытия и основания, что отличает её от традиционных моделей для однородных подшипников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thajeel, M. M. Bearing condition monitoring: a review of feature extraction in temporal, spectral, and joint temporal-spectral domains / M. M. Thajeel, H. R. Al-Bugharbee // Diagnostyka. - 2026. - Vol. 27, no. 1. - Art. 216964. - DOI: 10.29354/diag/216964.
2. Vibration-based wear condition estimation of journal bearings using convolutional autoencoders / C. Ates et al. // Sensors. 2023. Vol. 23, no. 22. Art. 9212. DOI: 10.3390/s23229212.
3. Марахин, Н.А.. Поля давления и грузоподъемность радиально-упорных подшипников жидкостного трения с многоклиновой конической поверхностью / Н.А. Марахин// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 2 (370) -2025 – С. 82-88.
4. Machine-learning-based wear prediction in journal bearings under start–stop conditions / F. König, F. Wirsing, A. Singh, G. Jacobs // Lubricants. - 2024. - Vol. 12, no. 8. - Art. 290. - DOI: 10.3390/lubricants12080290.
5. Visualising the lubrication condition in hydrodynamic journal bearings using impedance measurement / F. Koetz, F. Schmitt, E. Kirchner, E. Zancul // Frontiers in Mechanical Engineering. - 2024. - Vol. 10. - Art. 1456575. - DOI: 10.3389/fmech.2024.1456575
6. Шутин, Д.В. Методика и результаты экспериментального подтверждения силовых характеристик триботронных опор роторов в рамках процедур их оптимального проектирования / Д.В. Шутин, М.Г. Литовченко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 6 (368) -2024 – С. 56-64.
7. Rolling bearing remaining useful life prediction based on CNN-VAE-MBiLSTM / L. Yang, Y. Jiang, K. Zeng, T. Peng // Sensors. - 2024. - Vol. 24, no. 10. - Art. 2992. - DOI: 10.3390/s24102992

8. Борсуков, Г.В. Моделирование условий раскрываемости частиц медного шлака при ударе для применения в гидроабразивном резании / Г.В. Борсуков, О.Г. Кожус, Т.А. Журавлева и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(373) – 2025. С.24 – 33.
9. Поздняков В.В., Поляков Р.Н., Соломин О.В. Методика определения перечня критических узлов насосов путём анализа качества эксплуатации в реальных условиях // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 3(365). – С. 126–133
10. RUL prediction of rolling bearings based on fruit fly optimization algorithm optimized CNN-LSTM neural network / J. Shen, H. Zhou, M. Jin [et al.] // Lubricants. - 2025. - Vol. 13, no. 2. - Art. 81. - DOI: 10.3390/lubricants13020081.
11. Park, P. Remaining useful life estimation of bearings using data-driven ridge regression / P. Park, M. Jung, P. Di Marco // Applied Sciences. - 2020. - Vol. 10, no. 24. - Art. 8977. - DOI: 10.3390/app10248977.
12. Кожус О.Г. Закономерности взаимодействия абразивной частицы с каналом фокусирующей трубки сопла гидроабразивной установки при введении ПАВ / О.Г. Кожус, Г.В. Борсуков, Л.Ю. Фроленкова и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(368) – 2024. С.52 – 62.
13. Remaining useful life prediction based on deep learning: a survey / F. Wu, Q. Wu, Y. Tan, X. Xu // Sensors. - 2024. - Vol. 24, no. 11. - Art. 3454. - DOI: 10.3390/s24113454.
14. Борсуков, Г.В. Исследование процесса кристаллизации частиц медного шлака при высокотемпературной обработке для гидроабразивного резания / Г.В. Борсуков, Т.А. Журавлева, О.Г. Кожус и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(373) – 2025. С.21 – 28.
15. Rodichev, A.Y., Sytin, A.V., Barabash, V.V., Technological increase of adhesion strength between anti-friction coating and base in bimetal fluid-film bearings / Solid State Phenomena: International Conference on Industrial Engineering, ICIE-2017. Volume 265 SSP, 2017, Pages 284-289
16. 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.
17. Кожус О.Г. Повышение производительности гидроабразивного резания за счет модификации турбулентного пограничного слоя в канале сопла / О.Г. Кожус, Г.В. Борсуков, Т.А. Журавлева и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №2(364) – 2024. С.24 – 32.
18. Archard, J. F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces / J. F. Archard // Journal of Applied Physics. 1953. Vol. 24. № 8. P. 981–988. DOI: 10.1063/1.1721448.

Бондаренко Максим Эдуардович
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Доцент кафедры машиноведения, мехатроники и
робототехники
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

Яковленко Оксана Владимировна
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
студент
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: aksacha79@mail.ru

Родичев Алексей Юрьевич
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» г. Орел
Доцент кафедры машиноведения, мехатроники и
робототехники
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: rodfox@yandex.ru

Горин Андрей Владимирович
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Доцент кафедры машиноведения, мехатроники и
робототехники
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: gorin57@mail.ru

BONDARENKO M.E., RODICHEV A.Yu., YAKOVLENKO O.V., GORIN A.V.

MODELING THE WEAR PROCESS OF RADIAL PLAIN BEARINGS WITH MULTILAYER ANTI-FRICTION COATINGS

Abstract. *This article presents a methodology for calculating and modeling the wear process of a journal sliding bearing with a hard anti-wear coating. The methodology is based on Archard's law for calculating the wear rate of a thin coating layer and the bearing base separately. The entire process is divided into several phases, each characterized by the type and parameters of tribological contacts. Particular attention is paid to a geometric model based on the intersection of two circles to determine the actual contact area and the redistribution of loads between materials as the coating degrades. The results of numerical simulation in the MatLab environment confirm the non-linear nature of changes in contact areas and friction paths. The presented methodology is designed for the implementation of predictive analysis systems for wear and remaining life of sliding journal bearings, capable of operating in real-time without specialized sensors for direct wear measurement.*

Keywords: *journal bearing, anti-wear coating, wear prediction, remaining useful life.*

BIBLIOGRAPHY

1. Thajeel, M. M. Bearing condition monitoring: a review of feature extraction in temporal, spectral, and joint temporal-spectral domains / M. M. Thajeel, H. R. Al-Bugharbee // *Diagnostyka*. - 2026. - Vol. 27, no. 1. - Art. 216964. - DOI: 10.29354/diag/216964.
2. Vibration-based wear condition estimation of journal bearings using convolutional autoencoders / C. Ates et al. // *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 22. Art. 9212. DOI: 10.3390/s23229212.
3. Marakhin, N.A.. Pressure fields and load-carrying capacity of radial-thrust fluid friction bearings with a multi-wedge conical surface / N.A. Marakhin // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. - Orel: I.S. Turgenev OSU - No. 2 (370) 2025 - Pp. 82-88.
4. Machine-learning-based wear prediction in journal bearings under start-stop conditions / F. König, F. Wirsing, A. Singh, G. Jacobs // *Lubricants*. - 2024. - Vol. 12, no. 8. - Art. 290. - DOI: 10.3390/lubricants12080290.
5. Visualizing the lubrication condition in hydrodynamic journal bearings using impedance measurement / F. Koetz, F. Schmitt, E. Kirchner, E. Zancul // *Frontiers in Mechanical Engineering*. - 2024. - Vol. 10. - Art. 1456575. - DOI: 10.3389/fmech.2024.1456575
6. Shchutin, D.V. Methodology and results of experimental confirmation of the power characteristics of tribotronic rotor supports within the framework of their optimal design procedures / D.V. Shutin, M.G. Litovchenko // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. - Orel: Orel State University named after I.S. Turgenev - No. 6 (368) 2024 - P. 56-64.
7. Rolling bearing remaining useful life prediction based on CNN-VAE-MBiLSTM / L. Yang, Y. Jiang, K. Zeng, T. Peng // *Sensors*. - 2024. - Vol. 24, no. 10. - Art. 2992. - DOI: 10.3390/s24102992
8. Borsukov, G.V. Modeling the conditions for the opening of copper slag particles upon impact for use in waterjet cutting / G.V. Borsukov, O.G. Kozhus, T.A. Zhuravleva, et al. // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: Orel State University named after I.S. Turgenev*, No. 5 (373) – 2025. Pp. 24 – 33.
9. Pozdnyakov V.V., Polyakov R.N., Solomin O.V. Methodology for Determining the List of Critical Pump Components by Analyzing the Quality of Operation in Real Conditions // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2024. – No. 3(365). – P. 126–133
10. RUL prediction of rolling bearings based on fruit fly optimization algorithm optimized CNN-LSTM neural network / J. Shen, H. Zhou, M. Jin [et al.] // *Lubricants*. - 2025. - Vol. 13, no. 2. - Art. 81. - DOI: 10.3390/lubricants13020081.
11. Park, P. Remaining useful life estimation of bearings using data-driven ridge regression / P. Park, M. Jung, P. Di Marco // *Applied Sciences*. - 2020. - Vol. 10, no. 24. - Art. 8977. - DOI: 10.3390/app10248977.
12. Kozhus, O.G. Regularities of interaction of an abrasive particle with the channel of the focusing tube of a waterjet cutting unit nozzle upon introduction of a surfactant / O.G. Kozhus, G.V. Borsukov, L.Yu. Frolenkova, et al. // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: I.S. Turgenev State University*, No. 6 (368) – 2024. Pp. 52 – 62.
13. Remaining useful life prediction based on deep learning: a survey / F. Wu, Q. Wu, Y. Tan, X. Xu // *Sensors*. - 2024. - Vol. 24, no. 11. - Art. 3454. - DOI: 10.3390/s24113454.
14. Borsukov, G.V. Study of the crystallization process of copper slag particles during high-temperature treatment for waterjet cutting / G.V. Borsukov, T.A. Zhuravleva, O.G. Kozhus, et al. // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: I.S. Turgenev OSU*, No. 5 (373) - 2025. Pp. 21 - 28.
15. Rodichev, A.Y., Sytin, A.V., Barabash, V.V., Technological increase of adhesion strength between anti-friction coating and base in bimetal fluid-film bearings / *Solid State Phenomena: International Conference on Industrial Engineering, ICIE-2017*. Volume 265 SSP, 2017, Pages 284-289
16. 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 OSU - No. 3 (353) 2022 - P. 73-82.
17. Kozhus O.G. Increasing the productivity of waterjet cutting due to modification of the turbulent boundary layer in the nozzle channel / O.G. Kozhus, G.V. Borsukov, T.A. Zhuravleva et al. // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. Orel: I.S. Turgenev No. 2 (364) – 2024. P. 24 – 32.
18. Archard, J. F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces / J. F. Archard // *Journal of Applied Physics*. 1953. Vol. 24. No. 8. P. 981–988. DOI: 10.1063/1.1721448.

Bondarenko Maxim Eduardovich

Orel State University
Associate professor of the mechanical engineering,
mechatronics and robotics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

Yakovlenko Oksana Vladimirovna

Orel State University
student
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: aksacha79@mail.ru

Rodichev Alexey Yuryevich

Orel State University
Associate professor of the department mechanical
engineering, mechatronics and robotics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: rodfox@yandex.ru

Gorin Andrei Vladimirovich

Orel State University
Associate professor of the department mechanical
engineering, mechatronics and robotics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: gorin57@mail.ru

НГУЕН Т.Х., КАЗАКОВ Ю.Н., САВИН Л.А.

ПРОЕКТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ РАДИАЛЬНО-УПОРНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

Аннотация. Рассмотрены конструктивные схемы и принципы функционирования различных видов радиально-упорных гидродинамических подшипников. Сформированы аналитические зависимости для проведения проекторочного расчета ГДП с коническими, коническо-цилиндрическими поверхностями и комбинаций радиального и осевого многоклинового подшипников. Представлены результаты расчета геометрических параметров гидродинамических коническо-цилиндрических подшипников.

Ключевые слова: Гидродинамические коническо-цилиндрические подшипники, проекторочный расчет, математическое моделирование, аналитические зависимости, геометрические параметры.

Введение

Подшипниковые узлы являются критическими элементами роторных машин, во многом определяющими их надежность, ресурс, нагрузочную способность, энергетические и динамические характеристики. В большинстве случаев в рабочих трактах машин действуют соизмеримые радиальные и осевые силы, передача которых на корпус и снижение эффектов в зоне трения происходит благодаря наличию опор роторов. Несмотря на широкое применение в технических системах различных видов подшипников качения вследствие высокого уровня стандартизации и взаимозаменяемости, существует ряд случаев проектирования роторных машин, когда использование подшипников скольжения, прежде всего жидкостного трения, становится не только более рациональным, но и практически безальтернативным. В первую очередь, это относится к тяжелым энергетическим электро- и турбоагрегатам, насосам, компрессорам, детандерам, сложно нагруженным технологическим и двигательным установкам. Преимущества подшипников скольжения с гидродинамическим, гидростатическим и гибридным способом формирования грузоподъемности определяются практически неограниченным ресурсом при обеспечении жидкостного режима работы и возможностью воспринимать большие, в том числе динамические нагрузки.

В современном машиностроении применяют различные виды радиально-упорных подшипниковых узлов, выбор конструктивных особенностей которых связан с учетом условий функционирования, свойствами применяемых смазочных материалов, способами их подачи в зону трения, а также габаритными размерами. При проектировании роторных машин часто возникают проблемы, связанные с размещением опорных, демпфирующих и уплотнительных устройств в ограниченном конструктивном пространстве с условием обеспечения прочности, грузоподъемности, минимальных потерь мощности и выполнения других заданных требований. Наибольшее распространение в насосных и энергетических агрегатах получил способ установки роторов с радиальными подшипниками и двусторонним подпятником (рисунок 1). В этом случае синтез геометрических параметров этих опор проводится фактически отдельно с учетом заданных радиальных и осевых сил. Проектированию радиальных подшипников жидкостного трения и подпятников посвящено большое число работ с использованием базовых положений гидродинамической теории смазки [1-5]. Вопросы расчета ГДП с неизотермической постановке с учетом упругих деформаций опорных поверхностей, эффектов турбулентности и реологических свойств смазки представлены в статьях и монографиях [6-9].

В варианте компоновки роторной системы с использованием подшипников скольжения с коническими опорными поверхностями основными недостатками является повышенная чувствительность к перекосам, сложность установки монтажного конструктивного зазора и обеспечения устойчивости пространственного движения ротора в смазочном слое. В связи с этим конические подшипники не получили широкого практического применения и значительного уровня исследований. Можно отметить работы [10-12], в которых рассмотрены

принципы моделирования и расчета стационарных и динамических характеристик этих радиально-упорных подшипников.

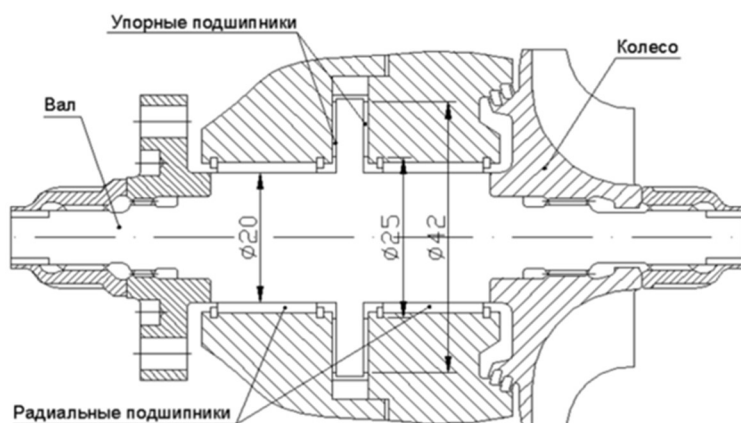


Рисунок 1 – Схема роторного агрегата с радиально-упорными подшипниками

Перспективным направлением создания радиально-упорных подшипниковых узлов является использование комбинированных гидродинамических подшипников, в которых цилиндрическая поверхность воспринимает радиальную нагрузку, а коническая всю осевую нагрузку и часть радиальной. Предварительный анализ показал возможности таких опор рационально распределить нагрузку между поверхностями и обеспечить высокую несущую способность при минимальных габаритных размерах. Проведенные расчеты также свидетельствуют о высокой энергоэффективности коническо-цилиндрических подшипников (КЦПС) [12,13]. Одним из потенциальных достоинств КЦПС является также возможность использования управления толщиной смазочного слоя по одной координате, величиной гидродинамических реакций в радиальном и осевом направлениях и устойчивостью пространственного движения ротора.

Целью настоящей работы является разработка инженерной методики проекторочного расчета радиально-упорных гидродинамических подшипников, позволяющей на этапе эскизного проектирования определять основные геометрические параметры, обеспечивающие работоспособность при заданных нагрузках, а также проводить сравнительную оценку различных конструктивных решений.

Виды радиально-упорных подшипников и структура проектирования

Схемы комбинации радиального и упорного, конического и коническо-цилиндрического подшипников (КЦП) представлены на рисунке 2. В реальных машинах подпятники и радиальные опоры располагаются в роторных системах, как правило, отдельно. Для подачи и отвода смазочного материала из рабочих зон этих подшипников также используются отдельные гидравлические каналы, что усложняет конструкцию и увеличивает массо-габаритные показатели. Приведенная в данном случае структура опоры позволяет более качественно провести сравнительный анализ возможностей обеспечения грузоподъемности радиальных и осевых сил, а также габаритных размеров различных видов радиально-упорных подшипниковых узлов. Независимо от вида схемы, подшипниковые узлы представляют собой осесимметричные структуры и могут быть представлены двумя основными параметрами, а именно, внутренним d и наружным D диаметрами и длиной L отдельных участков.

Методика проектирования ГДП содержит проектный и проверочный расчет, которые в свою очередь включают этапы структурного и параметрического синтеза, процедуру моделирования, комплекс вычислительных экспериментов с последующим анализом и выбором рационального варианта [10].

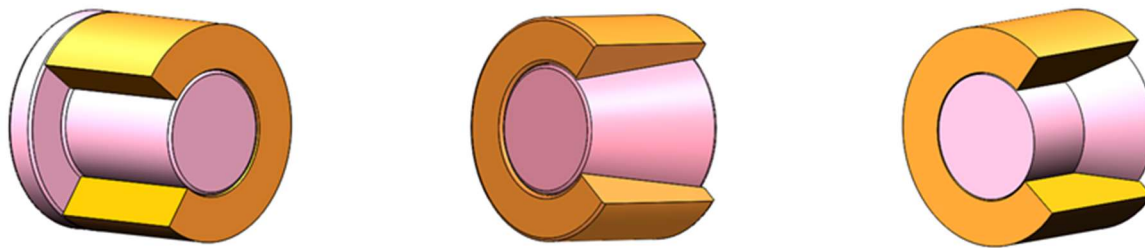


Рисунок. 2 – 3D-схемы радиально-упорных гидродинамических подшипников

Проектировочный расчет радиального подшипника скольжения в общем случае основывается условии прочности по допускаемым давлениям на опорной поверхности:

$$p = \frac{F}{DL} \leq [P]; L \geq \frac{F}{D[P]} \quad (1)$$

где F – нагрузка;

$[P]$ – допускаемые давления;

D – диаметр подшипника.

Исходными данными в общем случае проектирования служат: конструктивная схема подшипника, условия функционирования и способ смазки, нагрузка на опору, диаметр опорной части вала и допускаемые давления для антифрикционного материала втулки. При проведении проектировочных расчетов подшипников скольжения традиционно используется ряд общепринятых в инженерной практике допущений, а именно, контактное давление принимается равномерно распределенным по рабочим поверхностям, равнодействующая реакций в опорах приложена в центральной точке, если не учитывается способ дросселирования смазочного материала, материал подшипника работает в упругой области без пластических деформаций. При проектировании гидродинамических подшипников также рассматриваются в качестве допущений отсутствие износа, стационарный температурный режим; жидкостное трение с постоянной вязкостью смазочного материала.

Диаметр вала определяется путем проектного расчета по напряжениям кручения:

$$D = \sqrt[3]{\frac{T}{0.2 \cdot [\tau]}} \quad (2)$$

с последующим конструктивным уточнением размера опорной зоны. Действующие на подшипник силы равны реакциям R_a и R_b в опорах (рисунок 3), которые определяются на основе построения эпюр крутящих и изгибающих моментов при проверочном расчете валов с учетом значений действующих сил F_a , F_b , F_r на рабочих колесах.

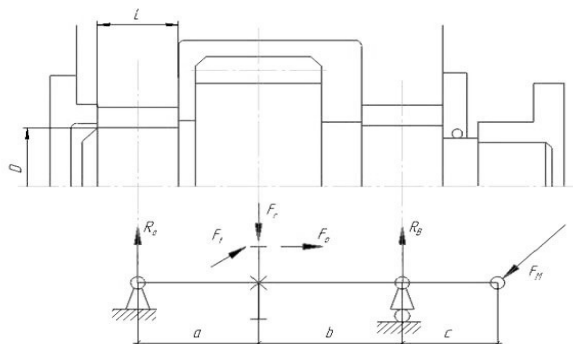


Рисунок 3 – Расчетная схема реакций в опорах ротора

Для радиально-осевых подшипников последовательность расчета имеет свои особенности, заключающиеся в необходимости учета соотношения радиальной и осевой нагрузок, способа установки ротора в опорах, условия подачи и слива смазочного материала из зоны трения и других факторов. Для количественной оценки несущей способности различных конструкций рассматриваемых подшипников в данном случае используется

коэффициент нагрузки $K_F = F_a/F_r$, характеризующий отношение осевой и радиальной сил. При анализе КЦП дополнительно вводится коэффициент распределения нагрузки k , определяющий долю в общей радиальной нагрузке подшипника, приходящуюся на коническую часть.

Выбор рационального варианта конструктивного решения подшипника проводится с использованием ряда параметров, основным из которых в данном случае является длина подшипника L_{total} , определяющая при заданном диаметре не только осевые размеры, но и габариты узла, а также возможность его размещения в ограниченном пространстве. Дополнительным критерием, связанным с объемом, является материалоемкостью конструкции.

Для обобщения результатов и исключения влияния абсолютных размеров применяется метод безразмерного анализа. Вводятся следующие безразмерные параметры: относительная длина $\lambda = L/D$, относительный диаметр δ_m, δ ; безразмерные σ, β . Использование безразмерных величин позволяет распространить полученные результаты на широкий класс геометрически подобных конструкций и выявить общие закономерности, не зависящие от конкретных размеров.

Таблица 1: Исходные параметры

№	Исходные параметры	Обозначение	Значение	Единица измерения
1	Допустимое давление материала	$[P]$	6	$МПа$
2	Допустимое напряжение материала	$[\tau]$	4	$МПа$
3	Осевая нагрузка	F_a	8000	H
4	Радиальная нагрузка	F_r	15000	H
5	Плотность материала	ρ	7800	$кг/м^3$

В таблице 1 приведены базовые значения исходных параметров, принятые при выполнении численных экспериментов. Эти значения соответствуют типичному узлу трения средней нагруженности и используются в качестве отправной точки при проведении параметрических исследований.

Для сравнительного анализа и исследования влияния различных факторов на характеристики подшипников предусмотрена возможность варьирования следующими параметрами:

- коэффициент нагрузки $K_F = F_a/F_r$, изменяющийся в диапазоне от 0,1 до 10,0;
- коэффициент распределения нагрузки k между конической и цилиндрической частями (для КЦПС), изменяющийся от 0,1 до 0,9.

Математические модели рассматриваемых конструкций

Модель раздельного радиально-упорного подшипника

Конструкция раздельного подшипника предполагает, что радиальная и осевая нагрузки воспринимаются независимыми поверхностями: цилиндрической (радиальная часть) и торцевой (упорная часть).

Упорная часть

Площадь опорной поверхности упорного подшипника определяется наружным D и внутренним d диаметрами:

$$A_a = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (3)$$

Условие работоспособности по давлению:

$$p = \frac{F_a}{A_a} \leq [P] \quad (4)$$

Из (4) получаем минимально необходимый наружный диаметр:

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{4F_a}{\pi[P]}} \quad (5)$$

Для дальнейшего сравнения принимаем равенство в (5), определяя минимальный диаметр, при котором упорная часть работоспособна.

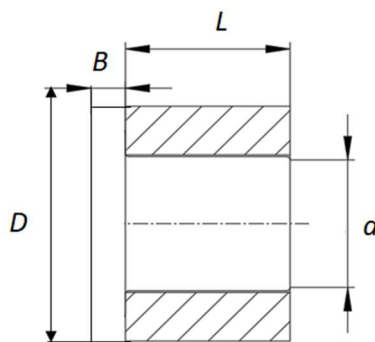


Рисунок 4 – Радиально-упорный подшипниковый узел с подпятником

Радиальная часть

Длина цилиндрической поверхности L определяется из условия нагружения проекции этой поверхности на диаметральную плоскость:

$$L \geq \frac{F_r}{[P]d} = \frac{F_a}{\kappa_F [P]d} \quad (6)$$

Формула для вылета B

Длина вылета B определяется из условия нагружения проекции этой поверхности на диаметральную плоскость:

$$B \geq \frac{F_a}{\pi [\tau] d} \quad (7)$$

Полная длина подшипника:

$$L_{total} = (L + B) \geq \frac{F_a}{\pi [\tau] d} + \frac{F_a}{\kappa_F [P] d} \quad (8)$$

Подставляя (6) в (8) и выражая через коэффициент нагрузки $\kappa_F = F_a/F_r$, получаем:

$$L_{total} \geq \frac{F_a}{d} \left(\frac{1}{\pi [\tau]} + \frac{1}{\kappa_F [P]} \right) \quad (9)$$

В безразмерной форме:

$$\lambda_{total} = \frac{L_{total}}{D} ; \sigma = \frac{F_a}{[P] D^2} ; \gamma = \frac{[\tau]}{[P]} \quad (10)$$

$$\lambda_{total} \geq \sigma \left(\frac{1}{\pi \gamma} + \frac{1}{\kappa_F} \right)$$

Модель чисто конического подшипника

В данном гидродинамическом подшипнике радиальная и осевая силы с рабочих колес воспринимаются конической поверхностью (рисунок 5). Нормальная составляющая нагрузки, вызывающая контактное давление, равна:

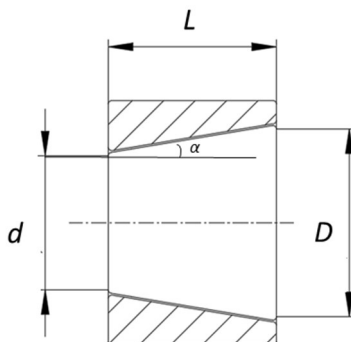


Рисунок 5 – Схема конического ГДП

В коническом подшипнике обе нагрузки воспринимаются конической поверхностью. Нормальная составляющая нагрузки, вызывающая контактное давление, равна:

$$F_n = F_r \cos(\alpha) + F_a \sin(\alpha) \quad (11)$$

где α – угол конуса.

Выражая через $\kappa_F = F_a/F_r$, получаем:

$$\kappa_F = \frac{F_a}{F_r}; F_n = F_a \left(\frac{\cos(\alpha)}{\kappa_F} + \sin(\alpha) \right) \quad (12)$$

Площадь конической поверхности, воспринимающей нагрузку:

$$A = \frac{\pi D_m L_{conical}}{\cos(\alpha)}; D_m = \frac{D + d}{2} \quad (13)$$

Условие прочности:

$$p = \frac{F_n}{A} \leq [P] \quad (14)$$

В результате перестановки получаем:

$$L_{conical} \geq \frac{F_a \left(\frac{\cos(\alpha)}{\kappa_F} + \sin(\alpha) \right) \cos(\alpha)}{\pi [P] D_m} \quad (15)$$

Угол α связан с геометрическими параметрами:

$$\cos(\alpha) = \frac{L_{conical}}{\sqrt{\left(\frac{D-d}{2}\right)^2 + L_{conical}^2}} \quad (16)$$

Подстановка (16) в (15) приводит к кубическому уравнению относительно $L_{conical}$:

$$L_{conical}^2 - \frac{F_a}{\kappa_F \pi [P] D_m} L_{conical} + \left[\left(\frac{D-d}{2}\right)^2 - \frac{F_a(D-d)}{2\pi [P] D_m} \right] \geq 0 \quad (17)$$

Таким образом, мы можем сделать вывод:

$$L_{conical} \geq \frac{1}{2} \left[\frac{F_a}{\kappa_F \pi [P] D_m} + \sqrt{\left(\frac{F_a}{\kappa_F \pi [P] D_m}\right)^2 - 4 \left[\left(\frac{D-d}{2}\right)^2 - \frac{F_a(D-d)}{2\pi [P] D_m} \right]} \right] \quad (18)$$

В безразмерной форме:

$$\lambda_{conical} = \frac{L_{conical}}{D}; \sigma = \frac{F_a}{[P] D^2}; \delta_m = \frac{1 + \beta}{2}; \beta = \frac{d}{D}; \Delta = 1 - \beta. \quad (19)$$

$$\lambda_{conical} \geq \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma}{\kappa_F \pi \delta_m} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\kappa_F \pi \delta_m}\right)^2 - 4 \left[\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 - \frac{\sigma \Delta}{2\pi \delta_m} \right]} \right]$$

Модель коническо-цилиндрического подшипника (КЦПС)

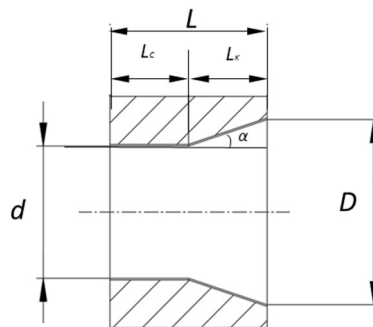


Рисунок 6 – Схема КЦПС

Основная идея КЦПС заключается в рациональном распределении нагрузки между конической и цилиндрической частями.

Введем коэффициент k ($0 \leq k \leq 1$), показывающий, какая часть радиальной нагрузки воспринимается конической частью. Тогда:

- коническая часть воспринимает: осевую силу F_a и радиальную силу kF_r ;
- цилиндрическая часть воспринимает: радиальную силу $(1-k)F_r$.

Коническая часть

Аналогично чисто коническому подшипнику, но с заменой F_r на kF_r :

$$L_k \geq \frac{F_a \left(k \frac{\cos(\alpha_k)}{\kappa_F} + \sin(\alpha_k) \right) \cos(\alpha_k)}{\pi[P]D_m} \quad (20)$$

Угол α_k связан с геометрическими параметрами:

$$\cos(\alpha_k) = \frac{L_k}{\sqrt{\left(\frac{D-d}{2}\right)^2 + L_k^2}} \quad (21)$$

Подстановка (21) в (20) дает кубическое уравнение:

$$L_k^2 - \frac{kF_a}{\kappa_F \pi[P]D_m} L_k + (D-d)^2 - \frac{F_a(D-d)}{\pi[P]D_m} \geq 0 \quad (22)$$

Цилиндрическая часть

Длина цилиндрической части определяется аналогично (6), но с учетом только части радиальной нагрузки:

$$L_c \geq \frac{(1-k)F_a}{\kappa_F[P]D} \quad (23)$$

Полная длина

Полная длина КЦПС:

$$L_{\text{КЦПС}} = L_c + L_k \quad (24)$$

Подставляя (22) и (23) в (24), получаем систему уравнений для определения оптимальных параметров КЦПС.

$$L_{\text{КЦПС}} \geq \frac{1}{2} \left[\frac{2(1-k)F_a}{\kappa_F[P]D} + \frac{kF_a}{\kappa_F \pi[P]D_m} + \sqrt{\left(\frac{kF_a}{\kappa_F \pi[P]D_m} \right)^2 - 4 \left[\left(\frac{D-d}{2} \right)^2 - \frac{kF_a(D-d)}{2\pi[P]D_m} \right]} \right] \quad (25)$$

В безразмерной форме:

$$\lambda_{\text{КЦПС}} = \frac{L_{\text{КЦПС}}}{D}; \quad \sigma = \frac{F_a}{[P]D^2}; \quad \delta_m = \frac{1+\beta}{2}; \quad \beta = \frac{d}{D}; \quad \Delta = 1 - \beta. \quad (26)$$

$$\lambda_{\text{КЦПС}} \geq \frac{1}{2} \left[\frac{2(1-k)\sigma}{\kappa_F} + \frac{k\sigma}{\kappa_F \pi \delta_m} + \sqrt{\left(\frac{k\sigma}{\kappa_F \pi \delta_m} \right)^2 - \Delta^2 + \frac{2k\sigma\Delta}{\pi \delta_m}} \right]$$

Методика численного моделирования

Для реализации предложенных математических моделей разработана программа в среде MATLAB. Структура программы включает следующие основные блоки:

- Определение базового диаметра D – расчет по формуле (1) для отдельного подшипника и принятие этого значения для всех трех типов (обеспечивает сопоставимость сравнения).

- Расчет длин подшипников – решение уравнений (11), (19), (24)-(25) для всего диапазона варьируемых параметров.

- Коэффициента k – 0.5.

- Визуализация результатов – построение графических зависимостей.

Особенностью реализации является численное решение кубических уравнений (19) и (24) с отбором положительных действительных корней. Для обеспечения сходимости при малых значениях L используется итерационный алгоритм.

Результаты расчета

График на рисунке 7 показывает, что для всех типов подшипников требуемая относительная длина λ увеличивается с ростом κ_F (т.е. с увеличением доли осевой нагрузки). Наибольшей чувствительностью к изменению κ_F обладает раздельный подшипник, что выражается в наиболее крутом росте его кривой. Чисто конический подшипник демонстрирует наименьшие значения λ во всем диапазоне малых и средних значений κ_F (до ~ 1.5). Коническо-цилиндрический подшипник (КЦПС) занимает промежуточное положение, однако его кривая расположена значительно ближе к коническому, чем к раздельному, что подтверждает эффективность комбинированной схемы.

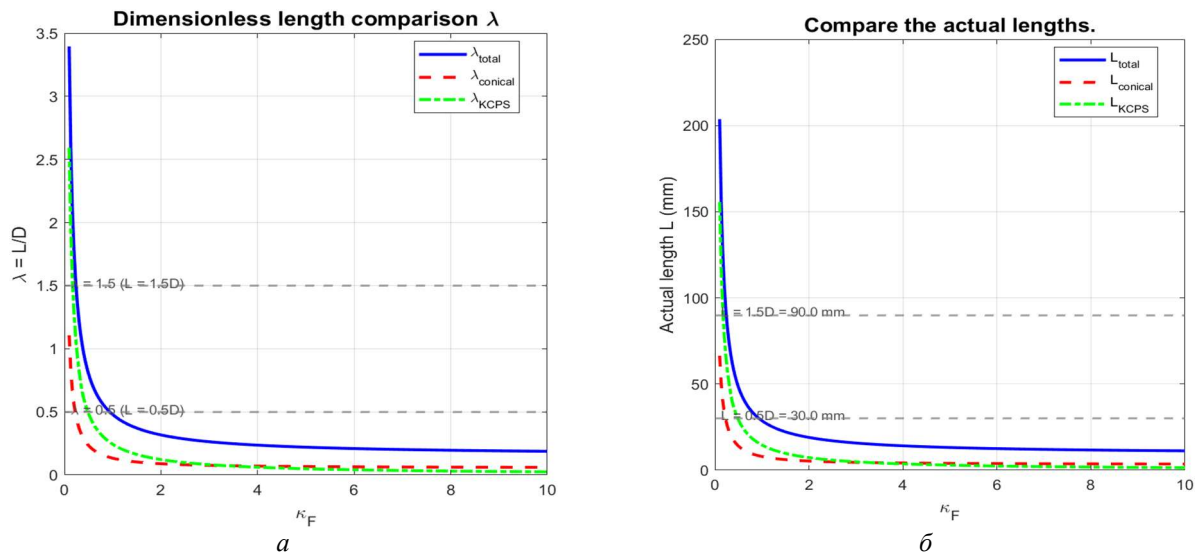


Рисунок 7 — Зависимость длины типов подшипников скольжения от κ_F :

a — безразмерной длины $\lambda = L/D$; *б* — полной длины L

График полной длины L позволяет провести количественное сравнение. Кривые подтверждают, что раздельный подшипник требует существенно больших габаритов, особенно в области малых κ_F (высокие радиальные нагрузки). Например, при $\kappa_F = 0,2$ длина раздельного подшипника составляет более 30 мм, в то время как для КЦПС и конического подшипника этот параметр не превышает 15 мм. При $\kappa_F = 2,3$ кривые конического и КЦПС подшипников пересекаются, соответствует полной длине $L \approx 12$ мм. При $\kappa_F > 2.3$ (доминирование осевой силы) КЦПС становится более компактным.

Заключение

В статье представлена методика проекторочного расчета радиально-осевого подшипника скольжения комбинированной конструкции (коническо-цилиндрической). Выполнен сравнительный анализ трех типов опор: раздельного радиально-упорного, чисто конического и коническо-цилиндрического подшипников. На основе безразмерного анализа получены аналитические зависимости для определения геометрических параметров, обеспечивающих работоспособность подшипника при заданных нагрузках. Разработано программное обеспечение в среде MATLAB, позволяющее проводить оценку эффективности различных конструктивных решений.

Определена область рационального применения рассмотренных конструкций: чисто конические подшипники наиболее эффективны при доминировании осевых нагрузок ($\kappa_F < 2.3$), в то время как применение КЦПС предпочтительно в условиях высоких радиальных нагрузок ($\kappa_F > 2.3$) и жестких ограничений на осевое пространство. Дальнейшее развитие работы может быть направлено на учет динамических факторов, температурных деформаций и исследование процессов изнашивания в комбинированных подшипниках скольжения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00789-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00789/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усков, М.К. Гидродинамическая теория смазки: этапы развития, современное состояние, перспективы / Усков М.К., Максимов В.А. // М.: Наука, 1985.
2. Максимов, В.А. Гидродинамическая теория смазки: этапы развития, современное состояние, перспективы / Максимов, В.А. // Труды Международного научного симпозиума "Гидродинамическая теория смазки - 120 лет". Т. 1. М.: Машиностроение-1, Орел: ОрелГТУ. 2006. С. 30-40.
3. Sebastian, S. Analysis of a conical aerostatic bearing/ Sebastian, S // 8-th International BearingSymp. – Leicester, 1981. – P. 237 – 250 (англ.).
4. Максимов, В.А. Высокоскоростные опоры скольжения гидродинамического трения / Максимов, В.А., Баткис Г.С. // Казань: Фэн. 2004. 406 с.
5. Srinivasan, K. Steady state characteristics of conical hybrid bearings / Srinivasan K., Prabhu B. S. // Wear. – 1983. – 89. – № 1. – P. 57 – 67 (англ.).
6. Pande, S. Analysis of tapered-land hybrid aerostatic journal bearings / Pande S. S., Somasundaram S. // Wear. – 1982. – 81. – № 1. – P. 97 – 107 (англ.).
7. Максимов В.А. Газовая смазка: перспективы применения в турбомашиностроении / Максимов В.А. // Казань: ЗАО "НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа". 2002. 154 с.
8. Корнеев, А.Ю. Конические подшипники жидкостного трения / Корнеев, А. Ю., Савин, Л. А., и Соломин, О. В. // Монография. - Москва: Машиностроение-1, 2008.
9. Prabhu, T. Characteristics of conical hydrostatic thrust bearings under rotation / Prabhu T. Jayachandra, Ganesan N. // Wear. – 1981. – 73. – № 1. – P. 95 – 122 (англ.).
10. Нгуен, Т.Х. Влияние структурных параметров на формирование полей гидродинамических давлений в радиально-упорных подшипниках жидкостного скольжения / Нгуен Тхай Ха //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии/ № 5 (367) 2024. с. 44-51.
11. Нгуен, Т.Х. Параметрический синтез коническо-цилиндрических подшипников скольжения / Нгуен, Т.Х., Казаков Ю.Н., Шутин Д.В., Савин Л.А. // Транспортное машиностроение. 2025. №. 9. С. 11-21. DOI: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2025-9-11-21>.
12. Савин Л.А.Обоснование выбора структуры радиально-осевых опор роторов / Савин Л.А., Корнеев А.Ю. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 7. Ч. 2. с. 343-349.
13. Корнеев, А. Ю.Особенности проекторочного расчета конических подшипников жидкостного трения / Корнеев, А. Ю., и Савин, Л. А.// Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, по. 3/299 (2013): 3–8.

Нгуен Тхай Ха
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел Аспирант аспирант кафедры машиноведения, мехатроники и робототехники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
E-mail: havcn@mail.ru

Казаков Юрий Николаевич
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел Аспирант аспирант кафедры машиноведения, мехатроники и робототехники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
E-mail: kazakyurii@yandex.ru

Савин Леонид Алексеевич
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел д.т.н., профессор кафедры машиноведения, мехатроники и робототехники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
E-mail: savin3257@mail.ru

NGUYEN THAI HA, KAZAKOV YU.N., SAVIN L.A.

DESIGN CALCULATION OF RADIAL-AXIAL HYDRODYNAMIC BEARINGS

Abstract. *The design concepts and operating principles of various types of radial thrust hydrodynamic bearings are examined. Analytical relationships are developed for design calculations of hydrodynamic bearings with conical, conical-cylindrical surfaces, and combinations of radial and axial multi-lobe bearings. The results of calculating the geometric parameters of hydrodynamic tapered-cylindrical bearings are presented.*

Keywords: *Hydrodynamic tapered-cylindrical bearings, design calculations, mathematical modeling, analytical relationships, geometric parameters.*

BIBLIOGRAPHY

1. Uskov, M.K. Hydrodynamic Theory of Lubrication: Stages of Development, Current Status, and Prospects / Uskov, M.K., Maksimov, V.A. // Moscow: Nauka, 1985.
2. Maksimov, V.A. Hydrodynamic Theory of Lubrication: Stages of Development, Current Status, and Prospects / Maksimov, V.A. // Proceedings of the International Scientific Symposium "Hydrodynamic Theory of Lubrication - 120 Years". Vol. 1. Moscow: Mashinostroenie-1, Orel: OrelSTU. 2006. Pp. 30-40.
3. Sebastian, S. Analysis of a Conical Aerostatic Bearing / Sebastian, S // 8th International Bearing Symp. - Leicester, 1981. - Pp. 237 - 250 (English).
4. Maksimov, V.A. High-Speed Sliding Bearings with Hydrodynamic Friction / Maksimov, V.A., Batkis, G.S. // Kazan: Fan. 2004. 406 p.
5. Srinivasan, K. Steady State Characteristics of Conical Hybrid Bearings / Srinivasan K., Prabhu B.S. // Wear. - 1983. - 89. - No. 1. - P. 57-67 (English).
6. Pande, S. Analysis of Tapered-Land Hybrid Aerostatic Journal Bearings / Pande S.S., Somasundaram S. // Wear. - 1982. - 81. - No. 1. - P. 97-107 (English).
7. Maksimov, V.A. Gas Lubrication: Prospects of Application in Turbomachinery / Maksimov, V.A. // Kazan: ZAO "NIIturbokompressor im. V.B. Shneppa". 2002. 154 p.
8. Korneev, A.Yu. Tapered fluid friction bearings / Korneev, A.Yu., Savin, L.A., and Solomin, O.V. // Monograph. - Moscow: Mashinostroenie-1, 2008.
9. Prabhu, T. Characteristics of conical hydrostatic thrust bearings under rotation / Prabhu T. Jayachandra, Ganesan N. // Wear. - 1981. - 73. - No. 1. - P. 95-122 (English).
10. Nguyen, T.H. Influence of structural parameters on the formation of hydrodynamic pressure fields in radial thrust fluid plain bearings / Nguyen Thai Ha // Fundamental and applied problems of engineering and technology / No. 5 (367) 2024. pp. 44-51.
11. Nguyen, T.Kh. Parametric synthesis of tapered-cylindrical plain bearings / Nguyen, T.Kh., Kazakov Yu.N., Shutin D.V., Savin L.A. // Transport engineering. 2025. No. 9. pp. 11-21. DOI: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2025-9-11-21>.
12. Savin, L.A. Justification for the Selection of the Structure of Radial-Axial Rotor Supports / Savin, L.A., Korneev, A.Yu. // Bulletin of Tula State University. Technical Sciences. 2013. Issue 7. Part 2. pp. 343-349.
13. Korneev, A. Yu. Features of the Design Calculation of Tapered Liquid Friction Bearings / Korneev, A. Yu., and Savin, L.A. // Bulletin of OrelSTU. Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, no. 3/299 (2013): 3-8.

Nguyen Thai Ha

Orel State University named after
I.S. Turgenev, Orel
Graduate student
302020, Orel, Naugorskoye shosse,
29
8(4862) 41-98-49
E-mail: havcn@mail.ru

Kazakov Yuri Nikolaevich

Orel State University named after I.S.
Turgenev, Orel
Graduate student
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph. 8 (4862) 41 98 49
E-mail: kazakyurii@yandex.ru

Savin Leonid Alekseevich

Orel State University named after
I.S. Turgenev, Orel
Doctor of sciences, professor
302020, Orel, Naugorskoye shosse,
29
8(4862) 41-98-49
E-mail: savin3257@mail.ru

© Нгуен Т.Х., Казаков Ю.Н., Савин Л.А., 2026

РОДИЧЕВ А.Ю., ЯКОВЛЕНКО О.В., ВАСИЛЬЕВ К.В.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИИ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Аннотация. В статье представлено исследование адгезионной прочности сцепления тонких твердых антифрикционных покрытий. Выполнен краткий анализ существующих способов определения адгезионной прочности тонких антифрикционных покрытий. Описаны методика и проведены эксперименты с помощью разрывной машины универсального назначения с электронным измерителем сил ИР5047-50 и переносным адгезиметром модели «Константа А». Получены ряд количественных оценок прочности сцепления антифрикционного покрытия с основанием. Сделаны выводы о прочности сцепления покрытия и методах определения ее адгезии. Даны рекомендации по применению методов для определения адгезионной прочности тонких твердых антифрикционных покрытий.

Ключевые слова: поверхность, трение, покрытие, пленка, адгезия, прочность.

Введение

В последние годы проблема повышения износостойкости деталей машин, в частности подшипников скольжения, все больше увязывается с теорией внешнего трения, разработкой теоретических основ изнашивания, стандартизацией методов испытания на износостойкость, создания современных аналитических методов расчета. Одним из наиболее современных и перспективных способов защиты различных механизмов от интенсивного износа является применение твердых антифрикционных покрытий [1,2]. Твердые антифрикционные покрытия способны образовывать тонкую смазывающую пленку на поверхности трения или сопряженной поверхности во время скольжения, разделяющую трущиеся поверхности и обладающую низким коэффициентом трения [3].

Современные твердые антифрикционные покрытия очень похожи на лакокрасочные покрытия. Отличия заключаются в том, что вместо красящего пигмента антифрикционные покрытия содержат высокодисперсные частицы твердых смазочных веществ. Эти вещества равномерно распределены в смеси связующих элементов и растворителей [4,5]. К высокодисперсным частицам твердых смазочных веществ относятся графит, дисульфид молибдена, ПТФЭ и нано-частицы [6, 7]. С применением новых антифрикционных материалов остро встает вопрос о контроле качества поверхности твердых антифрикционных покрытий на поверхности трения узлов и деталей машин.

Одним из основных показателей качества поверхности является адгезия. Однако методик определения адгезии тонких (5 до 30 мкм) твердых антифрикционных покрытий при литературном обзоре не было выявлено. Если учесть, как было сказано ранее, что современное твердое антифрикционное покрытие максимально схоже по своему составу и толщине с лакокрасочным покрытием, мы можем допустить применение методик для определения адгезии лакокрасочных покрытий к тонким твердым антифрикционным покрытиям. Если рассматривать систему «основание – покрытие» можно выделить несколько основных методик оценки прочности связей (адгезию) покрытия с жесткими подложками (метал), которые применяются на практике при изготовлении, упрочнении и ремонте машин, узлов и агрегатов, ими являются пять ГОСТов [8-12] и один стандарт [13]. Перед проведением теста на адгезию антифрикционного покрытия необходимо определиться с методом тестирования. В большей степени интерес представляют количественные методы определения адгезии.

Теория

Испытания на прочность адгезии твердого антифрикционного покрытия согласно ГОСТ 27890-88 и стандарту D 4541-02 в чем-то схожи. Оба метода дают количественную оценку адгезии, что при современных тенденциях получения точных значений является неоспоримым преимуществом [14, 15]. Эти методы основаны на определении величины адгезии, которая достигается с помощью измерения усилия отрыва образца или специального элемента - грибка, приклеиваемого к контролируемому покрытию [16, 17]. Усилие отрыва

создается с помощью привода различных типов (механического, электрического, электромеханического). Величина усилия отрыва считывается по положению стрелки индикатора относительно шкалы. Устройство считывания может быть различных типов – механического, электронного, а также комбинированного. Принципиальная схема измерения адгезии образцов методом нормального отрыва по ГОСТ 27890-88 (Рисунок 1) включает в себя образцы 1 и 2, твердое антифрикционное покрытие 3 и клеевой состав 4. На образец 2 нанесено твердое антифрикционное покрытие, которое через клеевой состав соединено с образцом 1 при этом данный образец 2 является неподвижным, а к образцу 1 прикладывается усилие F перпендикулярное плоскости сечения образцов 1 и 2.

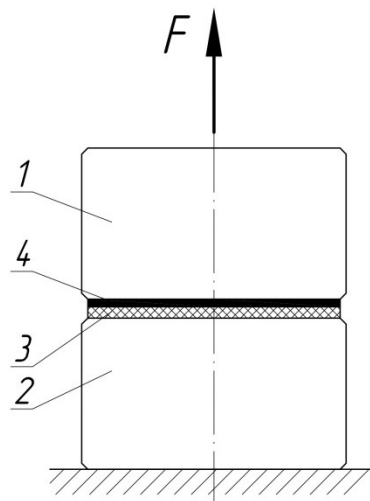


Рисунок 1 - Схема измерения адгезии по ГОСТ 27890-88

Принципиальная схема измерения адгезии покрытия при помощи переносных адгезиометров согласно стандарта Д 4541 – 02 (Рисунок 2) включает в себя образец (грибок) 1, стальную пластину 2, твердое антифрикционное покрытие 3 и клеевой состав 4. На образец 2 нанесено твердое антифрикционное покрытие 3, которое через клеевой состав соединено с образцом (грибком) 1. При этом стальная пластина 2 является неподвижной, а к образцу 1 прикладывается усилие F перпендикулярное его плоскости сечения.

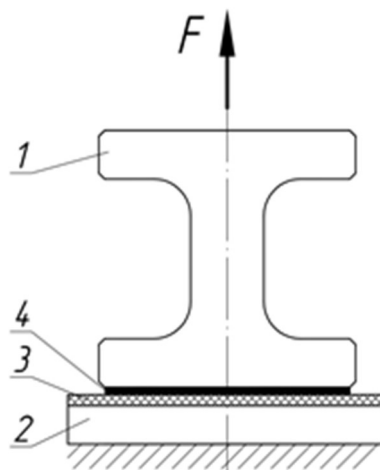


Рисунок 2 - Схема измерения адгезии по ГОСТ 27890-88

Основным условием для использования данных методик является расположение образца или специального элемента (грибка) и приложение к нему фактического усилия перпендикулярно поверхности отрыва [18,19].

Если данные условия соблюдены, то величину адгезии данных методик можно определить по формуле [20]:

$$X = 4F/\pi d^2, \quad (1)$$

где X - оттягивающее усилие (величина адгезии), достигнутое при отрыве;
 F - фактическое усилие, приложенное на испытываемую поверхность;
 d - эквивалентный диаметр изначальной поверхности, подвергшейся нагрузке.

Рассмотрим определение адгезии с помощью двух самых распространённых и доступных методов количественной оценки величины адгезии. Подложкой в нашем случае является металлическая пластина и основание цилиндрической формы, изготовленный из Стали 20. Материалом нанесенного покрытия будет антифрикционное покрытие на основе дисульфида молибдена (12%) с органическим связующим, отверждаемое при нормальной температуре. Нанесение покрытия осуществлялось в три слоя, толщина твердого антифрикционного покрытия составила 12 мкм.



Рисунок 3 - Разрывная машина ИР 5047-50

Испытания на прочность адгезии твердого антифрикционного покрытия согласно ГОСТ 27890-88 проводилось на разрывной машине универсального назначения с электронным силоизмерителем ИР 5047-50 при температуре 20°C и относительной влажности 70% (Рисунок 3).



Рисунок 4 - Образцы для испытаний

Для установки в разрывную машину образцов использовались шпильки (Рисунок 4).

Результаты и обсуждение

Нагрузка разрушения фиксировалась с помощью специального программного обеспечения, при этом выводится протокол испытаний и результаты эксперимента дублировались на экран монитора (Рисунок 5).

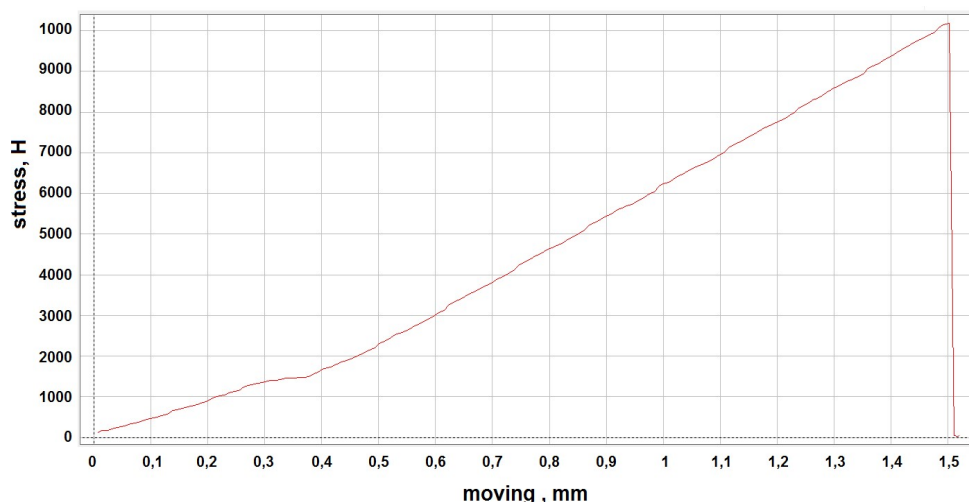


Рисунок 5 - Результаты эксперимента

Испытания на прочность адгезии твердого антифрикционного покрытия согласно стандарта D4541-02 проводилось при помощи переносного адгезиметра механического модели «Константа А» (Рисунок 6).



Рисунок 6 - Адгезиметр механический модели «Константа А»

Данный прибор и его модификации нашли широкое применения на различных предприятиях в том числе судостроительных, машиностроительных, транспортных. Определение величины адгезии достигается с помощью определения измерения усилия отрыва грибка, приклеиваемого к контролируемому покрытию (Рисунок 7).



Рисунок 7 - Специальные элементы (грибки) приклеенные к покрытию

Усилие отрыва создается винт-гайкой, взводящей пружинный механизм, связанный с грибком. Величина усилия отрыва считывается по положению стрелки индикатора относительно шкалы, а величина адгезии определяется по формуле 1. Фрагмент образца с

нанесенным пленочным антифрикционным покрытием после проведения испытаний представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 - Фрагмент образца после испытаний

Выводы

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- для количественной оценки адгезии тонкого антифрикционного покрытия наиболее рационально применять два способа: метод нормального отрыва согласно ГОСТ 27890-88 и метод измерения адгезии при помощи переносных адгезиометров, согласно стандарта D 4541 – 02.

- метод нормального отрыва требует наличие сложного стационарного оборудования, при этом он является наиболее информативным.

- метод измерения адгезии при помощи переносных адгезиометров не требует стационарного оборудования, однако для получения точных результатов необходимо проведения большего числа опытов.

- в результате проведения экспериментальных исследований двумя количественными методами оценки адгезии тонкого твердого антифрикционного покрытия была получена удовлетворительная сходимость результатов экспериментов, которая составила не более 3%.

- таким образом можно сказать при соблюдении методики проведения экспериментальных исследований может применяться любой из предложенных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов [Текст]: справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. – Киев: Наукова думка, 1987.
2. Кожус О.Г. Закономерности взаимодействия абразивной частицы с каналом фокусирующей трубки сопла гидроабразивной установки при введении ПАВ / О.Г. Кожус, Г.В. Борсуков, Л.Ю. Фроленкова и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(368) – 2024. С.52 – 62.
3. Ярошевич, В.К. Антифрикционные покрытия из металлических порошков [Текст] / В.К. Ярошевич, М.А. Белорецкий. – Минск: Наука и техника, 1981. – 175 с.
4. Борсуков, Г.В. Моделирование условий раскрываемости частиц медного шлака при ударе для применения в гидроабразивном резании / Г.В. Борсуков, О.Г. Кожус, Т.А. Журавлева и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(373) – 2025. С.24 – 33.
5. Zhao, Meng. Application study of nano-copper based composite anti-friction coating for corrosion resistant couplings [Текст] / Zhao Meng, Xue-feng Zhang, Jingchao Zhang, Bin Hu, Yun Yang // *Journal of petroleum science And Engineering*. – Vol. 157. – 2017. – P. 1143-1147.
6. Борсуков, Г.В. Исследование процесса кристаллизации частиц медного шлака при высокотемпературной обработке для гидроабразивного резания / Г.В. Борсуков, Т.А. Журавлева, О.Г. Кожус и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(373) – 2025. С.21 – 28.
7. Кожус О.Г. Моделирование кинематических характеристик движения абразивных частиц в сопле гидроабразивного станка с ПАВ / О.Г. Кожус, Г.В. Борсуков, А.Л. Галиновский и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(365) – 2024. С.31 – 40.
8. ГОСТ 15140-78 Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии (1978).
9. ГОСТ 32702.2-2014 Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом Х-образного надреза (2014).
10. ГОСТ 31149-2014 Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза (2014).
11. ГОСТ 32299-2013 Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва (2013).
12. ГОСТ 27890-88 Покрытия лакокрасочные защитные дезактивируемые. Метод определения адгезионной прочности нормальным отрывом (1988).

13. D 4541–02 Стандартный метод испытания на прочность адгезии покрытия при помощи переносных адгезиометров (2002).
14. Курбатова, И.А. Технология, структура и свойства антифрикционных материалов на основе системы железо-медь, содержащих графит [Текст]: дис.... к.т.н. / Курбатова И.А. – М., 1986.
15. Кутьков, А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия [Текст] / А.А. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1976. – 152 с.
16. Rodichev, A.Yu. Technological increase of adhesion strength between anti-friction coating and base in bimetal fluid-film bearings [Текст] / A.Yu. Rodichev, A.V. Sytin, V.V. Barabash // Solid state phenomena: international conference on industrial engineering, ICIE-2017. – Vol. 265 SSP. – 2017. – P. 284-289.
17. 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.
18. Кожус О.Г. Повышение производительности гидроабразивного резания за счет модификации турбулентного пограничного слоя в канале сопла / О.Г. Кожус, Г.В. Борсуков, Т.А. Журавлева и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №2(364) – 2024. С.24 – 32.
19. Gorin, A.V. Adhesive strength research of film antifriction coatings [Текст] / A.V. Gorin, A.Yu. Rodichev, M.A. Tokmakova // Materials today: proceedings. – Vol. 19. – Part 5. – 2019. – P. 2329-23328/
20. Rodichev, A.Y. Formation of film antifriction coatings on the friction surfaces of machine parts [Текст] / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin, N.V. Tokmakov // IOP Conference series: materials science and engineering ICMTMTE. – 2019, 2020. – Vol. 709. – Issue 1, 709 022053

Родичев Алексей Юрьевич
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» г. Орел
Доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: rodfox@yandex.ru

Яковленко Оксана Владимировна
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
студент
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: aksacha79@mail.ru

Васильев Кирилл Владимирович
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
студент
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: rodfox@yandex.ru

RODICHEV A.Yu., YAKOVLENKO O.V., VASILIEV K.V.

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR STUDYING ADHESION OF ANTIFRICTION COATINGS OF FRICTION UNITS

Abstract. *The article presents a study of the adhesive strength of adhesion of thin solid antifriction coatings. A brief analysis of existing methods for determining the adhesive strength of thin antifriction coatings is performed. The method is described and experiments are carried out using a universal-purpose breaking machine with an electronic force meter IR5047-50 and a portable adhesive meter of the "Constant A" model. A number of quantitative estimates of the adhesion strength of the antifriction coating with the base are obtained. Conclusions are made about the adhesion strength of the coating and methods for determining its adhesion. Recommendations on the application of methods for determining the adhesive strength of thin solid antifriction coatings are given.*

Keywords: *surface, friction, coating, film, adhesion, strength.*

BIBLIOGRAPHY

1. Thermal spray coatings from powder materials [Text]: reference book / Yu. S. Borisov, Yu. A. Kharlamov, S. L. Sidorenko, E. N. Ardatovskaya. - Kyiv: Naukova Dumka, 1987.
2. Kozhus, O. G. Regularities of interaction of an abrasive particle with the channel of the focusing tube of the nozzle of a waterjet installation upon introduction of a surfactant / O. G. Kozhus, G. V. Borsukov, L. Yu. Frolenkova, et al. // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: I. S. Turgenev State University, No. 6 (368) - 2024. P. 52 - 62.
3. Yaroshevich, V. K. Antifriction coatings from metal powders [Text] / V. K. Yaroshevich, M. A. Beloretsky. – Minsk: Nauka i Tekhnika, 1981. – 175 p.
4. Borsukov, G.V. Modeling the conditions for the opening of copper slag particles upon impact for use in waterjet cutting / G.V. Borsukov, O.G. Kozhus, T.A. Zhuravleva, et al. // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: I.S. Turgenev State University, No. 5 (373) – 2025. Pp. 24 – 33.
5. Zhao, Meng. Application study of nano-copper-based composite anti-friction coating for corrosion-resistant couplings [Text] / Zhao Meng, Xue-feng Zhang, Jingchao Zhang, Bin Hu, Yun Yang // Journal of petroleum science and engineering. – Vol. 157. – 2017. – Pp. 1143-1147.

6. Borsukov, G.V. Study of the crystallization process of copper slag particles during high-temperature treatment for waterjet cutting / G.V. Borsukov, T.A. Zhuravleva, O.G. Kozhus, et al. // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: I.S. Turgenev OSU, No. 5 (373) – 2025. Pp. 21 – 28.
7. Kozhus, O.G. Modeling of kinematic characteristics of the motion of abrasive particles in the nozzle of a waterjet machine with surfactants / O.G. Kozhus, G.V. Borsukov, A.L. Galinovsky, et al. // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: I.S. Turgenev, No. 3 (365) – 2024. Pp. 31 – 40.
8. GOST 15140-78 Paints and varnishes. Methods for determining adhesion (1978).
9. GOST 32702.2-2014 Paints and varnishes. Determination of adhesion by the X-shaped notch method (2014).
10. GOST 31149-2014 Paints and varnishes. Determination of adhesion by the cross-cut method (2014).
11. GOST 32299-2013 Paints and varnishes. Determination of adhesion by the pull-off method (2013).
12. GOST 27890-88 Protective deactivatable paint and varnish coatings. Method for determining adhesion strength by normal pull-off (1988).
13. D 4541-02 Standard Test Method for Coating Adhesion Strength Using Portable Adhesion Meters (2002).
14. Kurbatova, I.A. Technology, Structure, and Properties of Antifriction Materials Based on the Iron-Copper System Containing Graphite [Text]: Diss.... Cand. Sci. (Eng.) / Kurbatova, I.A. – Moscow, 1986.
15. Kutkov, A.A. Wear-Resistant and Antifriction Coatings [Text] / A.A. Kutkov. – Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 152 p.
16. Rodichev, A.Yu. Technological Increase of Adhesion Strength between Anti-Friction Coating and Base in Bimetal Fluid-Film Bearings [Text] / A.Yu. Rodichev, A.V. Sytin, V.V. Barabash // Solid state phenomena: international conference on industrial engineering, ICIE-2017. – Vol. 265 SSP. – 2017. – P. 284-289.
17. 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 State University, No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.
18. Kozhus, O.G. Increasing the productivity of waterjet cutting by modifying the turbulent boundary layer in the nozzle channel / O.G. Kozhus, G.V. Borsukov, T.A. Zhuravleva et al. // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: I.S. Turgenev OSU No. 2 (364) – 2024. Pp. 24 – 32.
19. Gorin, A.V. Adhesive strength research of film antifriction coatings [Text] / A.V. Gorin, A.Yu. Rodichev, M.A. Tokmakova // Materials today: proceedings. – Vol. 19. – Part 5. – 2019. – Pp. 2329-23328/
20. Rodichev, A.Y. Formation of film antifriction coatings on the friction surfaces of machine parts [Text] / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin, N.V. Tokmakov // IOP Conference series: materials science and engineering ICMTMTE. – 2019, 2020. – Vol. 709. – Issue 1, 709 022053

Rodichev Alexey Yuryevich
Orel State University
Associate professor of the department
mechatronics, mechanics and robotics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: rodfox@yandex.ru

Yakovlenko Oksana Vladimirovna
Orel State University
student
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: aksacha79@mail.ru

Vasiliev Kirill Vladimirovich
Orel State University
student
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: rodfox@yandex.ru

© Родичев А.Ю., Яковленко О.В., Васильев К.В., 2026

ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 615.47+612.135

DOI: 10.33979/2073-7408-2026-376-2-169-175

ЛОКТИОНОВА Ю.И., ЖАРКИХ Е.В., ДРЁМИН В.В., ПОТАПОВА Е.В.,
КРУПАТКИН А.И., ДУНАЕВ А.В.

АНАЛИЗ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ НА БИЛАТЕРАЛЬНЫХ УЧАСТКАХ КОЖИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОККЛЮЗИОННОЙ ПРОБЫ

Аннотация. Работа посвящена исследованию изменений микроциркуляции крови на билатеральных участках кожи во время окклюзионной пробы с помощью распределённой системы носимых анализаторов периферического кровотока на основе метода лазерной доплеровской флоуметрии. Предлагаемый подход заключается в дополнительном анализе параметров микроциркуляции крови поверхности кожи контралатеральной левой руки при проведении окклюзионной пробы, соответственно, на правой руке. Полученные результаты демонстрируют диагностический потенциал данного подхода при исследовании пациентов с различными нарушениями периферического кровотока верхних конечностей, например, в функциональной диагностике, ревматологии, кардиологии, эндокринологии и др.

Ключевые слова: оптическая неинвазивная диагностика, распределённая система носимых анализаторов, лазерная доплеровская флоуметрия, микроциркуляция крови, окклюзионная проба.

Введение

В современной медицине для диагностики функционального состояния периферического кровообращения применяют различные оптические неинвазивные технологии, но наибольшее распространение получил метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) [1]. Метод ЛДФ основан на неинвазивном зондировании биоткани низкоинтенсивным лазерным излучением и регистрации отраженного и рассеянного излучения от движущихся в диагностическом объёме эритроцитов. Результатом измерений является регистрация перфузии в виде показателя микроциркуляции крови (ПМ) в перфузионных единицах (пф. ед.).

В настоящее время повышению достоверности получаемых результатов при исследовании функционального состояния периферического кровотока способствует применение различных функциональных (нагрузочных) проб (ФП) [2-3]. Суть ФП заключается в оказании возмущающего воздействия на различные системы организма человека, в результате которых в зависимости от их состояния возникает определенный физиологический сдвиг, анализ которого позволяет определить их функциональное состояние, а также состояние организма в целом. Исследование динамики изменения физиологических показателей во время ФП и динамики их восстановления после снятия нагрузки является важным критерием функциональной оценки [4,5]. В качестве провокационных воздействий в настоящее время используют различные ФП, такие, как окклюзионная проба (ОП), тепловая, холодовая, дыхательная, постуральная, электростимуляционная и др. Наиболее часто применяемой в клинической практике пробой является ОП, осуществляемая путём пережатия кровеносных сосудов исследуемой конечности окклюзионной манжетой с целью полного прекращения кровотока, при этом анализ изменения кровотока осуществляется до, во время и после окклюзии [6]. В зависимости от характера оказываемого воздействия выделяют артериальную и венозную ОП. При выполнении артериальной ОП давление в манжете нагнетается до 150-250 мм рт. ст. (минимум на 30-40 мм рт. ст. выше систолического давления), что провоцирует развитие ишемии и отток крови из сосудов микроциркуляторного русла. Сменяющая ишемию после декомпрессии реактивная гиперемия вследствие активации миогенных и метаболических механизмов приводит к быстрому восстановлению кровотока. Артериальная ОП нашла широкое применение при исследовании резервных возможностей и реактивности микроциркуляторного русла, при этом оценка изменений кровенаполнения на разных этапах ОП делает возможной оценку широкого диапазона функциональных резервов микроциркуляторного русла.

Ранее на стационарном аппарате ЛДФ было продемонстрировано, что применение адаптивного вейвлет-преобразования при анализе ЛДФ-грамм позволяет более качественно оценивать динамику изменений амплитуд осцилляций кожного кровотока в исследуемых частотных диапазонах, что повышает информативность функциональной диагностики

периферических сосудов при проведении ОП [7]. Также в работе [8] было показана возможность анализа взаимосвязи процессов метаболизма и микрогемодинамики при исследовании препарата «Актовегин» с помощью 5-мин артериальной ОП с вейвлет-анализом осцилляций кровотока. Применение же новых портативных анализаторов ЛДФ в носимом беспроводном варианте исполнения [9, 10] открывает новые возможности для одновременной регистрации ЛДФ-грамм при ОП на различных билатеральных участках кожи рук с помощью расположения распределённой системы на теле испытуемого. Так, например, авторы [11] при применении всего одного носимого анализатора на предплечье показали возможность регистрации уменьшения постокклюзионного гиперемического периода у лиц с артериальной гипертензией по сравнению со здоровыми испытуемыми. В данной работе предлагается новый подход на основе применения распределённой системы носимых устройств ЛДФ для анализа периферического кровотока на билатеральных участках кожи при проведении артериальных окклюзионных проб.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились с использованием распределённой системы из 4-х носимых анализаторов «ЛАЗМА ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва) [12], реализующих метод ЛДФ, термометрию и имеющих встроенный акселерометр для контроля движений. Анализаторы закреплялись на теле испытуемого в 4-х зонах – билатеральных участках кожи рук на тыльной поверхности предплечья (область кожи почти без артериоло-венулярных анастомозов (АВА)) и ладонной поверхности дистальной фаланги 3-го пальца (область кожи с большим количеством АВА), как показано на рисунке 1. В качестве источника излучения в устройствах применяются VCSEL-лазеры с длиной волны 850 нм, а обмен данными с персональным компьютером осуществляется по протоколу Bluetooth.

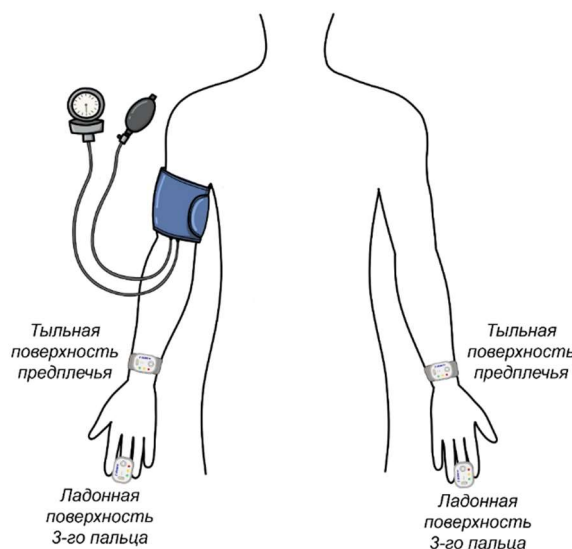


Рисунок 1 – Расположение 4-х анализаторов на теле испытуемого при выполнении артериальной ОП

Стандартная артериальная ОП проводилась с пережатием плечевой артерии на правой руке с помощью манжеты тонометра, в которую нагнетался воздух до достижения давления на уровне 200 мм рт. ст. Базальный кровоток регистрировался в течение 5 мин, сама окклюзия длилась 3 мин, после чего в течение 7 мин осуществлялась запись восстановления перфузии до исходного уровня. Отличительной особенностью данного эксперимента является то, что регистрация ЛДФ-грамм и последующий их анализ выполняется как для правой руки, непосредственно подверженной окклюзии, так и для второй руки (левой), окклюзия на которой не проводилась.

В исследовании приняли участие 47 условно здоровых добровольцев в возрасте 28 ± 13 лет без вредных привычек. Все испытуемые находились в положении сидя в состоянии физического и психологического покоя, руки располагались на столе на уровне сердца, ноги сгибались в коленях под прямым углом с опорой на полную стопу.

Результаты

В результате проведённых экспериментальных исследований на 47 условно здоровых добровольцах обработаны зарегистрированные ЛДФ-граммы при проведении артериальной ОП. На рисунке 2 представлены усреднённые значения со среднеквадратическими

отклонениями тканевой перфузии (ПМ) на билатеральных участках кожи рук для 3-го пальца (рисунок 2а) и предплечья (рисунок 2б) соответственно.

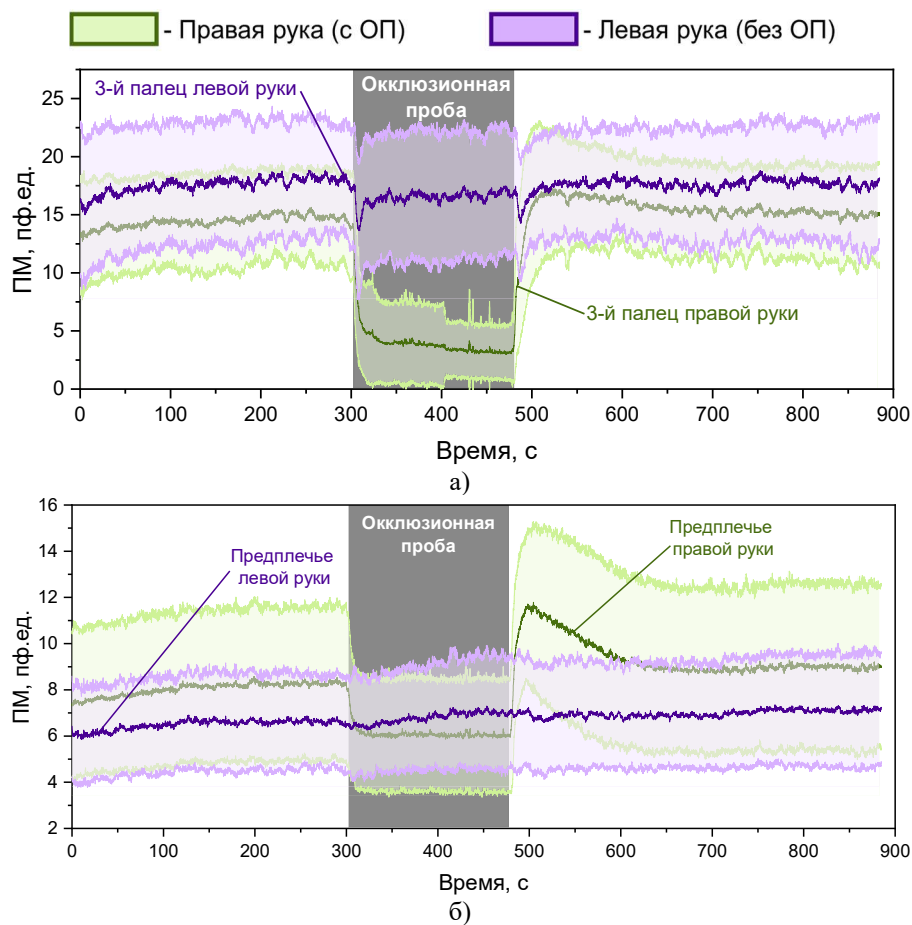


Рисунок 2 – Усреднённые значения со среднеквадратическими отклонениями тканевой перфузии на билатеральных участках кожи рук для 3-го пальца (а) и предплечья (б) при проведении артериальной ОП

Анализ полученных данных выявил отличия в реакциях на окклюзию в контралатеральных участках кожи (на левой руке), а именно – снижение средней перфузии во время окклюзии (отрезок ЛДФ-граммы, называемый «биологический нуль») на ладонной поверхности 3-го пальца по отношению к базальному кровотоку до начала окклюзии и её повышение в этот же период на тыльной стороне предплечья. Можно предположить, что разнонаправленные реакции на данных участках кожи связаны, соответственно, с наличием и отсутствием в них АВА. В целом, полученный результат в виде повышения средней перфузии на предплечье во время окклюзии на левой руке при её снижении на правой, подтверждает возможность применения анализа микроциркуляции крови на контралатеральном участке кожи в качестве оценки компенсаторной реакции в микроциркуляторном русле.

На рисунке 3 представлены усредненные данные кожной перфузии для каждого этапа исследования: до окклюзионной пробы (до ОП), во время окклюзии (ОП), для периода постокклюзионной реактивной гиперемии (ПОРГ), а также для периода восстановления после окклюзии.

Статистически значимые изменения показателя микроциркуляции крови в контралатеральной к окклюзированной конечности на каждом этапе выполнения ОП свидетельствуют о наличии регионарного компенсаторного перераспределения кровотока при выполнении пробы. Так, в области с АВА (пальцы рук) во время ПОРГ в левой руке наблюдается рост ПМ, сопоставимый по абсолютным значениям с перфузией правой руки, тогда так в области без АВА (предплечья) ПМ левого предплечья хоть и растет при ПОРГ, но не достигает уровня правого запястья. Выявленные различия в изменении контралатерального ПМ в области пальцев рук и предплечий можно связать с различной плотностью симпатических констрикторных волокон в этих областях – на ладонной поверхности пальцев рук их больше, что приводит к более выраженной их стимуляции в ответ на ишемию,

достаточной для рефлекторной спастической реакции на противоположной от окклюдруемой стороны. Полученные результаты демонстрируют возможность использования полученной информации для разработки новых диагностических критериев как функциональных резервов организма, так и нарушений при различных заболеваниях сердечно-сосудистой системы.

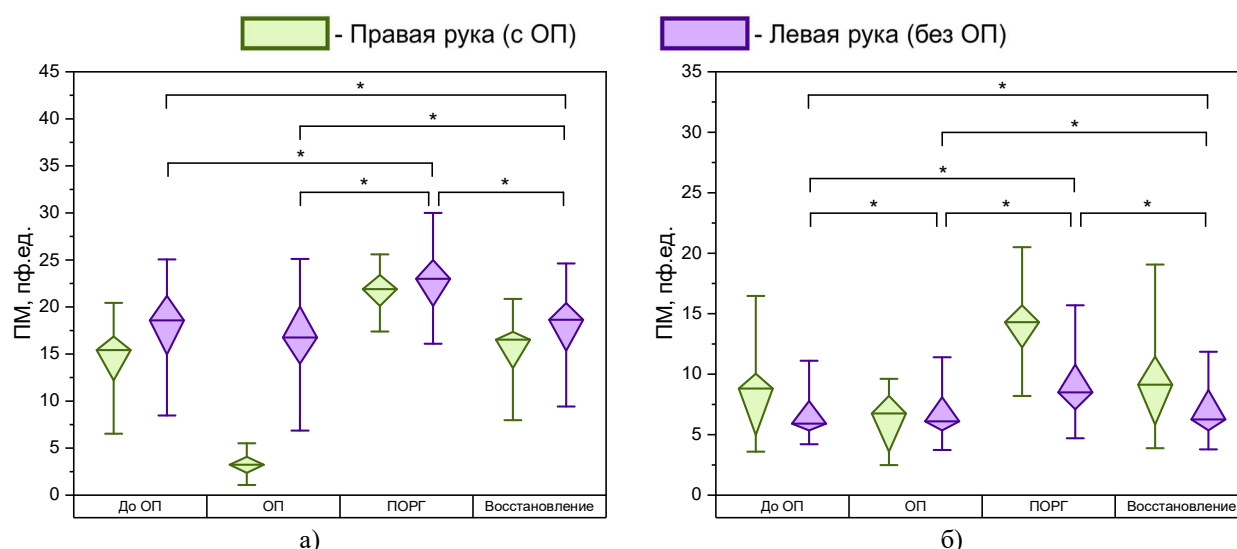


Рисунок 3 –Тканевая перфузия на билатеральных участках кожи рук для 3-го пальца (а) и предплечья (б) при проведении артериальной ОП

* - статистически значимые различия подтверждены парным ранговым тестом Вилкоксона, $p < 0,05$

Функциональное состояние организма при применении артериальной ОП обычно оценивается путём анализа таких расчётных параметров, как резерв кровотока (РК), время восстановления показателя микроциркуляции крови после окклюзии и т.д. [4]. Однако данные параметры рассчитывались только для конечности, подвергающейся окклюзии. Для оценки относительного изменения уровня тканевой перфузии непосредственно во время окклюзии в коже контралатеральной к окклюдированной руке в данной работе предлагается формула расчета окклюзионного резерва кровотока (ОРК):

$$ОРК = \frac{ПМ_{начО}}{ПМ_{конО}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где ОРК – окклюзионный резерв кровотока, рассчитываемый для контралатеральной к окклюдированной конечности, $ПМ_{начО}$ – средняя перфузия за первый 10 секунд ОП, $ПМ_{конО}$ – средняя перфузия за последние 10 секунд ОП.

В таблице 1 приведены результаты статистической обработки ПМ, РК и ОРК при ОП на билатеральных участках кожи, демонстрирующие разброс значений регистрируемых и расчётных параметров.

Таблица 1 – Результаты статистической обработки значений ПМ и РК на билатеральных участках кожи при ОП

№	Исследуемая зона	ПМ (до ОП), пф. ед.	ПМ (после ОП), пф. ед.	РК, %	ОРК, %
1	Правый палец	14,4±3,6	15,3±3,5	159,8±53,9	-
2	Левый палец	17,9±4,2	17,7±4,2	-	111,1±29,0
3	Правое предплечье	8,0±3,2	9,0±3,5	193,2±61,5	-
4	Левое предплечье	6,5±2,0	7,0±2,3	-	110,1±13,7

Стоит отметить, что ввиду высокой вариабельности в целом регистрируемых параметров ЛДФ (в среднем для исследуемых зон коэффициент вариации составляет 30-40%) рассчитываемый на основе ОП параметр РК демонстрируют высокую воспроизводимость (коэффициент вариации в большинстве случаев ниже 20 %) [13], что подтверждает целесообразность более глубокого анализа данных ОП не только на исследуемой руке, но и на

контралатеральном участке кожи для повышения воспроизводимости результатов исследования и более точной постановки диагноза. Представляется перспективным введение нового параметра – ОРК – для оценки компенсаторных реакций по аналогии с РК, но отражающего контралатеральный резервный кровоток с учетом повышения/снижения средней перфузии во время окклюзии на контралатеральном участке кожи.

Заключение

Предложенный в работе подход заключается в дополнительном анализе параметров микроциркуляции крови на контралатеральной поверхности кожи левой руки при проведении ОП, соответственно, на правой руке. В результате проведения пилотных экспериментальных исследований на условно-здоровых добровольцах получено различие в отклике на окклюзию на контралатеральной поверхности кожи на предплечье и среднем пальце руки, а именно – на предплечье отмечено повышение, а на среднем пальце снижение средней перфузии. В дальнейшем предлагается анализировать параметры перфузии до, во время и после окклюзии на контралатеральной поверхности, включая вейвлет-анализ и расчёт нового параметра – окклюзионный резерв кровотока, оценивающего компенсаторный механизм регуляции в микроциркуляторном русле по аналогии с параметром «резервный кровоток» на исследуемой руке.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют потенциал предложенного подхода при исследовании пациентов с различными нарушениями периферического кровотока верхних конечностей, например, в функциональной диагностике, ревматологии, кардиологии, эндокринологии и др., что и станет предметом дальнейших исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-75-00188, <https://rscf.ru/project/25-75-00188/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев, А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека [Текст]: монография / А.В. Дунаев. – ТНТ. – Старый Оскол, 2022. – 440 с.
2. Дунаев, А.В. Анализ физиологического разброса параметров микроциркуляторно-тканевых систем [Текст] / А.В. Дунаев, И.Н. Новикова, А.И. Жеребцова, А.И. Крупаткин, С.Г. Соколовский, Э.У. Рафаилов // Биотехносфера. – 2013. – Т. 29, № 5. – С. 44-53.
3. Рогаткин, Д.А., Метрологическое обеспечение методов и приборов неинвазивной медицинской спектрофотометрии [Текст] / Д.А. Рогаткин, А.В. Дунаев, Л.Г. Лапаева // Медицинская техника. – 2010. – Т. 260, №. 2. – С. 30-37.
4. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей [Текст] / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 496 с.
5. Рыжкова, Е.Г. Пространственная гетерогенность перфузии кожи и воспроизводимость результатов лазерной доплероскопической флоуметрии с температурными функциональными пробами у здоровых добровольцев [Текст] / Е.Г. Рыжкова, Т.Б. Моргунова, И.А. Рыжков, В.В. Фадеев // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2025. – Т. 23, №. 4. – С. 30-38.
6. Сагайдачный, А.А. Окклюзионная проба: методы анализа, механизмы реакции, перспективы применения [Текст] / А.А. Сагайдачный // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 5-22.
7. Жарких, Е.В. Возможности исследования изменений амплитуд колебаний кожного кровотока с помощью адаптивного вейвлет-анализа при проведении окклюзионных проб [Текст] / Е.В. Жарких, А.И. Жеребцова, И.Н. Маковик, В.В. Дрёмин, Е.А. Жеребцов, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – Т.314, № 6. – С. 114-121.
8. Федорович, А.А. Неинвазивная оценка вазомоторной и метаболической функции микрососудистого эндотелия в коже человека [Текст] / А.А. Федорович // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2013. – Т. 12, №. 2. – С. 15-25.
9. Dunaev, A. Wearable Devices for Multimodal Optical Diagnostics of Microcirculatory-Tissue Systems: Application Experience in the Clinic and Space [Text] / A. Dunaev // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2023. – Vol. 9, № 2. – P. 020201.
10. Сидоров, В.В. Система локальных анализаторов для неинвазивной диагностики общего состояния компартментов микроциркуляторно-тканевой системы кожи человека [Текст] / В.В. Сидоров, Ю.Л. Рыбаков, В.М. Гукасов, Г.С. Евтушенко // Медицинская техника. – 2021. – Т. 330, №. 6. – С. 4-6.
11. Муравьев, А.В. Постокклюзионная реактивная гиперемия у лиц с артериальной гипертензией по данным портативного двухканального лазерного анализатора микроциркуляции крови [Текст] / А.В. Муравьев // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2025. – Т. 24, № 4. – С. 32-39.
12. Пат. 2836326 Российская Федерация, МПК А61В 5/1455, А61В 5/026, G01N 21/64. Портативное мультимодальное устройство оптической спектроскопии для диагностики состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека [Текст] / Сидоров В.В., Жарких Е.В., Дунаев А.В.; заявитель и патентообладатель ООО НПП «ЛАЗМА», ООО «Оптическая диагностика». – N 2023126543; заявл. 17.10.2023; опубл. 12.03.2025, Бюл. № 8. – 11 с.: ил.

13. Паршакова, В.Е. Исследование физиологического разброса параметров микроциркуляторно-тканевых систем организма человека с помощью мультимодальных портативных анализаторов [Текст] / В.Е. Паршакова, Е.В. Жарких, Ю.И. Локтионова, А.В. Коськин, А.В. Дунаев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – Т. 364, № 2. – С. 165-176.

Локтионова Юлия Игоревна
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Аспирант кафедры
«Приборостроение, метрология и сертификация»,
стажер-исследователь научно-технологического центра биомедицинской фотоники
Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95
8 (4862) 41-98-37
E-mail: julya-loktionova@mail.ru

Жарких Елена Валерьевна
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия
Кандидат технических наук, научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95
8 (4862) 41-98-37
E-mail: ev.zharkikh@gmail.com

Дрёмин Виктор Владимирович
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95
8 (4862) 41-98-06
E-mail: dremen_viktor@mail.ru

Потапова Елена Владимировна
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия
Доктор технических наук, старший научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, профессор кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95
8 (4862) 41-98-06
E-mail: potapova_ev_ogu@mail.ru

Крупаткин Александр Ильич
ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова» МЗ РФ, г. Москва, Россия
Доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник отделения функциональной диагностики
Россия, г. Москва, ул. Приорова, д. 10
8 (495) 450-37-01
E-mail: krup.61@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия
Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, профессор кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95
8 (4862) 41-98-06
E-mail: dunaev@bmecenter.ru

LOKTIONOVA YU.I., ZHARKIKH E.V., DREMIN V.V., POTAPOVA E.V.,
KRUPATKIN A.I., DUNAEV A.V.

ANALYSIS OF MICROCIRCULATION OF BLOOD IN BILATERAL SKIN AREAS USING AN OCCLUSION TEST

Abstract. *This study examines changes in blood microcirculation in bilateral skin areas during an occlusion test using a distributed system of wearable peripheral blood flow analyzers based on laser Doppler flowmetry. The proposed approach involves additional analysis of blood microcirculation parameters on the skin surface of the contralateral left hand during an occlusion test on the right hand. The results demonstrate the diagnostic potential of this approach for examining patients with various peripheral blood flow disorders in the upper extremities, such as in functional diagnostics, rheumatology, cardiology, endocrinology, and other fields.*

Keywords: *optical noninvasive diagnostics, distributed system of wearable analyzers, laser Doppler flowmetry, blood microcirculation, occlusion test.*

BIBLIOGRAPHY

1. Dunaev, A.V. Multimodalnaya opticheskaya diagnostika mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem organizma cheloveka [Tekst]: monografiya / A.V. Dunaev. – TNT. – Staryj Oskol, 2022. – 440 s.
2. Dunaev, A.V. Analiz fiziologicheskogo razbrosa parametrov mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem [Tekst] / A.V. Dunaev, I.N. Novikova, A.I. ZHerebcova, A.I. Krupatkin, S.G. Sokolovskij, E.U. Rafailov // Biotekhnosfera. – 2013. – Т. 29, № 5. – С. 44-53.
3. Rogatkin, D.A., Метрологическое обеспечение методов и приборов неинвазивной медицинской спектrophотометрии [Text] / D.A. Rogatkin, A.V. Dunaev, L.G. Lapaeva // Biomedical Engineering. – 2010. – Vol. 44, №. 2. – P. 66-70.
4. Dunaev, A.V. Analiz fiziologicheskogo razbrosa parametrov mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem [Tekst] / A.V. Dunaev, I.N. Novikova, A.I. ZHerebcova, A.I. Krupatkin, S.G. Sokolovskij, E.U. Rafailov // Biotekhnosfera. – 2013. – Т. 29, № 5. – С. 44-53.
5. Ryzhkova, E.G. Prostranstvennaya geterogennost perfuzii kozhi i vosproizvodimost rezultatov lazernoj dopplerovskoj floumetrii s temperaturnymi funktsionalnymi probami u zdorovykh dobrovolcev [Tekst] / E.G. Ryzhkova,

T.B. Morgunova, I.A. Ryzhkov, V.V. Fadeev // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. – 2025. – T. 23, № 4. – S. 30-38.

6. Sagajdachnyj, A.A. Okklyuzionnaya proba: metody analiza, mekhanizmy reakcii, perspektivy primeneniya [Tekst] / A.A. Sagajdachnyj // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. – 2018. – T. 17, № 3. – S. 5-22.

7. Zharkih, E.V. Vozmozhnosti issledovaniya izmenenij amplitud kolebanij kozhnogo krovotoka s pomoshchyu adaptivnogo vejvlet-analiza pri provedenii okklyuzionnyh prob [Tekst] / E.V. Zharkih, A.I. Zherebcova, I.N. Makovik, V.V. Dryomin, E.A. Zherebcov, E.V. Potapova, A.V. Dunaev // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2015. – T.314, № 6. – S. 114-121.

8. Fedorovich, A.A. Neinvazivnaya ocenka vazomotornoj i metabolicheskoy funkcii mikrososudistogo endoteliya v kozhe cheloveka [Tekst] / A.A. Fedorovich // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. – 2013. – T. 12, № 2. – S. 15-25.

9. Dunaev, A. Wearable Devices for Multimodal Optical Diagnostics of Microcirculatory-Tissue Systems: Application Experience in the Clinic and Space [Text] / A. Dunaev // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2023. – Vol. 9, № 2. – P. 020201.

10. Sidorov, V.V. A system of local analyzers for noninvasive diagnostics of the general state of the tissue microcirculation system of human skin [Text] / V.V. Sidorov, Y.L. Rybakov, V.M. Gukasov, G.S. Evtushenko // Biomedical Engineering. – 2021. – Vol. 55, № 6. – P. 379-382.

11. Muravev, A.V. Postokklyuzionnaya reaktivnaya giperemiya u lic s arterialnoj gipertenziej po dannym portativnogo dvuhkanalnogo lazernogo analizatora mikrocirkulyacii krovi [Tekst] / A.V. Muravev // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. – 2025. – T. 24, № 4. – S. 32-39.

12. Pat. 2836326 Rossijskaya Federaciya, MPK A61B 5/1455, A61B 5/026, G01N 21/64. Portativnoe multimodalnoe ustrojstvo opticheskoy spektroskopii dlya diagnostiki sostoyaniya mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem organizma cheloveka [Tekst] / Sidorov V.V., Zharkih E.V., Dunaev A.V.; zayavitel i patentoobladatel OOO NPP «LAZMA», OOO «Opticheskaya diagnostika». – N 2023126543; zayavl. 17.10.2023; opubl. 12.03.2025, Byul. № 8. – 11 s.: il.

13. Parshakova, V.E. Issledovanie fiziologicheskogo razbrosa parametrov mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem organizma cheloveka s pomoshchyu multimodalnyh portativnyh analizatorov [Tekst] / V.E. Parshakova, E.V. Zharkih, YU.I. Loktionova, A.V. Koskin, A.V. Dunaev // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2024. – T. 364, № 2. – S. 165-176.

Loktionova Yulia Igorevna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Postgraduate Student of the Department “Instrument Engineering, Metrology and Certification”, Research Assistant of Research & Development Center of Biomedical Photonics
Russia, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: loktionovaui@yandex.ru

Zharkikh Elena Valerievna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Associate Professor of the Department “Instrument Engineering, Metrology and Certification”, Research Fellow of Research & Development Center of Biomedical Photonics
Russia, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: ev.zharkikh@gmail.com

Dremin Viktor Vladimirovich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Associate Professor of the Department “Instrument Engineering, Metrology and Certification”, Senior Research Fellow of Research & Development Center of Biomedical Photonics
Russia, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: dremin_viktor@mail.ru

Potapova Elena Vladimirovna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Professor of the Department “Instrument Engineering, Metrology and Certification”, Senior Research Fellow of Research & Development Center of Biomedical Photonics
Russia, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: potapova_ev_ogu@mail.ru

Krupatkin Alexander Ilyich

N.N. Priorov National Medical research center of traumatology and orthopaedics, Moscow, Russia
Leading Researcher of the Department of Functional Diagnostics
Russia, Moscow, st. Priorova, 10
8 (495) 450-37-01
E-mail: krup.61@mail.ru

Dunaev Andrey Valerievich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Professor of the Department “Instrument Engineering, Metrology and Certification”, Leading Researcher of Research & Development Center of Biomedical Photonics
Russia, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: inohvat@yandex.ru

© Локтионова Ю.И., Жарких Е.В., Дрёмин В.В., Потапова Е.В., Крупаткин А.И., Дунаев А.В., 2026

ЖАРКИХ Е.В., ЛОКТИОНОВА Ю.И., ЯНУШИН В.С., КОСЬКИН А.В., ДУНАЕВ А.В.

АНАЛИЗ РЕГИОНАРНЫХ РАЗЛИЧИЙ ПАРАМЕТРОВ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО-ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ ПРИ РАЗНОМ ПОЛОЖЕНИИ ТЕЛА ИСПЫТУЕМОГО

Аннотация. Работа посвящена анализу регионарных различий параметров микроциркуляторно-тканевых систем организма человека при разном положении тела испытуемого в пространстве. Результаты получены *in vivo* с помощью распределенной системы портативных мультимодальных анализаторов, реализующих методы лазерной доплеровской флоуметрии и флуоресцентной спектроскопии. Проведен комплексный анализ данных и расчет амплитудно-частотных спектров сигналов ЛДФ для различных топографо-анатомических участков кожи человека. Полученные результаты позволяют судить о направлениях изменений параметров микроциркуляторно-тканевых систем при изменении положения тела испытуемого в пространстве.

Ключевые слова: лазерная доплеровская флоуметрия, флуоресцентная спектроскопия, портативные мультимодальные анализаторы, распределённая система анализаторов, микроциркуляторно-тканевые системы, вейвлет-анализ.

Введение

Микроциркуляторно-тканевые системы (МТС) организма человека играют ключевую роль при целом ряде патологических состояний и вовлекаются в патологический процесс на самых ранних стадиях развития заболевания [1, 2]. Для диагностики функционального состояния МТС к настоящему времени разработано большое количество разнообразных методов, в том числе неинвазивных, основанных на технологиях биофотоники. Наиболее популярными из последних до сих пор остаются методы лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) и флуоресцентной спектроскопии (ФС) [3]. Благодаря появлению на рынке ультракомпактных полупроводниковых энергоэффективных лазеров и миниатюрных оптических спектрометров появилась возможность создать носимые устройства, реализующие методы ЛДФ и ФС [4-6]. Объединение двух диагностических технологий в одном носимом устройстве представляет определенные преимущества, так как обеспечивает проведение мультимодальной диагностики, а также предоставляет возможность ежедневного мониторинга параметров МТС. Миниатюризация мультимодальных анализаторов на основе методов ЛДФ и ФС позволяет создавать распределенные системы, состоящие из нескольких носимых устройств, для одновременной регистрации параметров в разных областях интереса [7, 8].

Стоит отметить, что большая часть проводимых в настоящее время исследований с применением технологий ЛДФ и ФС направлена на установление характеристик изменения параметров МТС в результате негативного действия тех или иных патологических факторов [9-11]. При этом сравнение полученных результатов с ранее опубликованными данными других авторских коллективов затруднено ввиду целого ряда факторов: не указана точная область измерения, не указано положение тела испытуемого при проведении измерения, не приведены численные значения полученных параметров и др. Для решения данной проблемы ранее предпринимались попытки проведения комплексных исследований по оценке пространственной и временной гетерогенности сигнала ЛДФ [12-16], долговременной вариабельности сигнала ЛДФ [17, 18], пространственной и временной вариабельности сигнала ФС [19, 20].

Таким образом, в последнее время наблюдается интерес научного сообщества к этой области исследований, обусловленный совершенствованием инструментальной базы измерений, что приводит к разработке новых экспериментальных протоколов, но отсутствие стандартизированных методов измерения приводит к тому, что данные технологии мало используются в клинической практике. Цель данной работы – проанализировать регионарные различия параметров микроциркуляторно-тканевых систем организма человека при разном положении тела испытуемого в пространстве с применением портативных мультимодальных анализаторов, реализующих методы ЛДФ и ФС.

Материалы и методы

Для реализации поставленной цели были проведены экспериментальные исследования с участием 41 условно здорового добровольца (17 м, 23 ж; средний возраст 21 ± 4 года). Все экспериментальные исследования проводились в помещении с контролируемыми параметрами микроклимата в дневное время не раньше, чем через 2 ч после последнего приема пищи. Регистрация параметров МТС осуществлялась с использованием распределенной системы портативных мультимодальных анализаторов «ЛАЗМА ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва, РФ), имеющих встроенные каналы регистрации ЛДФ и ФС, термометр и акселерометр для регистрации значений температуры исследуемой области и движений испытуемого в процессе измерений. Устройства располагали симметрично справа и слева в области кожи лба, висков, дорсальной поверхности нижней трети предплечий (запястья), вентральной поверхности нижней трети предплечья (предплечья), в области подушечек 3 пальцев рук.

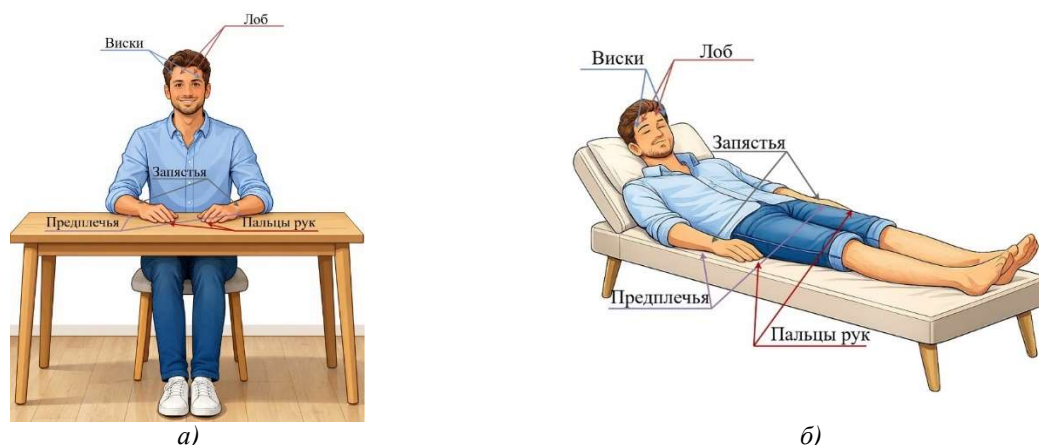


Рисунок 1 – Расположение добровольца и места фиксации анализаторов во время измерений в положении «сидя» (а) и «лёжа» (б)

Одновременно в исследовании было задействовано 6 анализаторов, в связи с чем было принято решение о реализации 2-х протоколов исследования: с длительной и с короткой регистрацией сигнала, чтобы сократить общую длительность исследования. Протокол исследования с длительной регистрацией сигнала заключался в 8-минутной фоновой записи сигналов ЛДФ и ФС сначала в положении «сидя», затем в положении «лёжа» и осуществлялся в области лба, запястий и пальцев рук. Протокол с короткой регистрацией сигнала заключался в 1-минутной фоновой записи сигналов ЛДФ и ФС и осуществлялся в области висков и предплечий в положениях «сидя» и «лёжа» сразу после окончания соответствующего этапа длительной регистрации. Положение испытуемого в процессе исследования с обозначенными областями исследования приведены на рисунке 1.

В ходе выполнения работы были рассчитаны и проанализированы следующие параметры:

– *ПМ* – показатель микроциркуляции крови, характеризует средний уровень перфузии тканей кровью за единицу времени и измеряется в перфузионных (относительных) единицах (пф. ед.);

– значения амплитуд колебаний кровотока в микроциркуляторном русле: эндотелиальных ($A_{\text{Э}}$, 0,0095–0,021 Гц), нейрогенных ($A_{\text{Н}}$, 0,021–0,052 Гц), миогенных ($A_{\text{М}}$, 0,052–0,145 Гц), дыхательных ($A_{\text{Д}}$, 0,145–0,6 Гц), амплитуда сердечных колебаний ($A_{\text{С}}$, 0,6–2 Гц) [19, 20];

– $A_{\text{НАДН}}$ – нормированная на обратно отражённое излучение амплитуда флуоресценции кофермента НАДН. Данный параметр рассчитывался по формуле:

$$A_{\text{НАДН}} = I_{460}/I_{365}, \quad (1)$$

где I_{460} – интенсивность флуоресценции кофермента НАДН в биологических тканях на длине волны 460 нм, I_{365} – интенсивность обратно отражённого излучения на длине волны возбуждения автофлуоресценции 365 нм.

Для оценки колебательной составляющей ПМ использовался спектральный вейвлет-анализ колебаний с применением непрерывного вейвлет-преобразования [21-23]. В исследованиях с длительной регистрацией сигнала оценивались все 5 компонентов спектра ЛДФ-сигнала, при короткой длительности регистрации данных рассчитывались амплитуды только миогенных, дыхательных и сердечных колебаний.

Статистический анализ данных был проведен в программном обеспечении Origin Pro 2021. Все сравниваемые параметры были проверены на нормальность распределения по критерию Колмогорова-Смирнова. Для проверки статистической значимости различий нормально распределённых данных использовался парный t-критерий Стьюдента, для ненормально распределённых данных использовался непараметрический парный критерий Вилкоксона (значения $p < 0,05$ считались значимыми). Результаты представлены в виде среднего значения $\pm$ СКО, если не указано иное.

Результаты

На рисунке 2 представлены усреднённые значения показателя микроциркуляции крови в исследованных областях при положении испытуемого «сидя» и «лёжа».

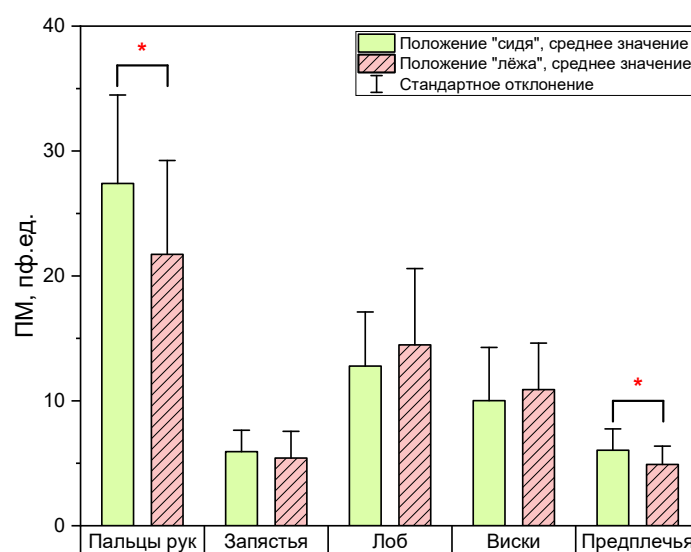


Рисунок 2 – Результаты анализа значений показателя микроциркуляции крови при разном положении тела испытуемого

Самым высоким значением ПМ по результатам исследования характеризуется область пальцев рук, для которой значения составили $27,4 \pm 7,4$ пф. ед. и $21,7 \pm 7,5$ пф. ед. в положениях «сидя» и «лёжа», соответственно. В области кожи лба и висков ПМ имеет промежуточные значения: $12,7 \pm 4,4$ п. ед. и $14,5 \pm 6,1$ пф. ед. для кожи лба и $9,8 \pm 4,2$ пф. ед. и $10,9 \pm 3,7$ пф. ед. для кожи висков. Наименьшими значениями характеризуется кожа запястий и предплечий, где ПМ составляет $5,9 \pm 1,7$ пф. ед. и $5,5 \pm 2,1$ пф. ед. для запястий и $5,9 \pm 1,6$ пф. ед. и $4,9 \pm 1,5$ пф. ед. для предплечий, соответственно. Различия в среднем значении ПМ между областями исследования объясняется разным анатомическим строением кожи в них, а также разным строением микроциркуляторного русла.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что изменение положения тела испытуемого в пространстве существенно влияет на регистрируемое значение показателя микроциркуляции. Отмечается значимое снижение ПМ в области пальцев рук и предплечий в положении «лёжа» по сравнению с параметрами, зарегистрированными в положении «сидя». ПМ области измерения на запястьях наименее подвержен изменениям при смене положения тела в пространстве. В таблице 1 приведены полученные численные значения параметров.

Из данных рисунка 2 и таблицы 1 также видно, что при нахождении в положении «лёжа» параметр ПМ в области кожи лба и висков испытуемых был в среднем выше, чем в положении «сидя», но это различие не достигло статистически значимого уровня.

Таблица 1 – Значения параметров микроциркуляции крови и кожной флуоресценции при измерении в положениях «сидя» и «лёжа»

Параметры		Лоб	р	Пальцы рук	р	Запястья	р
Области измерения с длительной регистрацией сигнала							
ПМ, пф. ед.	сидя	12,7±4,4	0,075	27,4±7,4*	< 0,01	5,9±1,7	0,16
	лёжа	14,5±6,1		21,7±7,5		5,5±2,1	
Аэ, пф. ед.	сидя	0,44±0,20	0,09	1,23±0,84	0,80	0,19±0,11	0,64
	лёжа	0,37±0,16		1,18±0,78		0,20±0,17	
Ан, пф. ед.	сидя	0,50±0,25*	0,02	1,23±0,82	0,88	0,22±0,10	0,10
	лёжа	0,40±0,16		1,26±0,72		0,18±0,10	
Ам, пф. ед.	сидя	0,80±0,28*	< 0,01	1,09±0,64	0,81	0,27±0,13*	< 0,01
	лёжа	0,65±0,30		1,12±0,59		0,20±0,11	
Ад, пф. ед.	сидя	0,40±0,14	0,68	0,60±0,16	0,95	0,16±0,05	0,13
	лёжа	0,39±0,15		0,60±0,21		0,14±0,05	
Ас, пф. ед.	сидя	0,69±0,31	< 0,01	0,80±0,22*	0,03	0,22±0,08	0,61
	лёжа	0,97±0,43		0,97±0,38		0,21±0,07	
АнаДн, отн. ед.	сидя	6,65±8,48	0,08	0,54±0,26	0,72	3,88±4,14	0,51
	лёжа	3,90±2,98		0,57±0,21		2,83±1,52	
Области измерения с короткой регистрацией сигнала							
		Виски	р	Предплечья		р	
ПМ, пф. ед.	сидя	9,8±4,2	0,12	5,9±1,6*	< 0,01		
	лёжа	10,9±3,7		4,9±1,5			
Ам, пф. ед.	сидя	0,50±0,24	0,68	0,19±0,11	0,05		
	лёжа	0,47±0,25		0,15±0,11			
Ад, пф. ед.	сидя	0,37±0,15	0,40	0,23±0,11*	< 0,01		
	лёжа	0,40±0,19		0,14±0,04			
Ас, пф. ед.	сидя	0,56±0,28	< 0,01	0,23±0,06	0,44		
	лёжа	0,75±0,36		0,21±0,10			
АнаДн, отн. ед.	сидя	2,43±1,74	0,97	2,28±1,35	0,24		
	лёжа	2,82±2,50		2,75±1,97			

* - статистическая значимость различий подтверждена с использованием парного t-критерия Стьюдента (для нормально распределённых данных) или парного критерия Вилкоксона (для данных с распределением, отличным от нормального)

На рисунке 3 приведены усреднённые значения амплитуд колебаний кровотока. При анализе амплитуд колебаний сигнала ЛДФ выявлено значимое снижение амплитуд нейрогенных и миогенных колебаний в области кожи лба при нахождении испытуемого в положении «лёжа» при одновременном увеличении амплитуд сердечных колебаний. Данный результат представляет определенный интерес, особенно на фоне отсутствия значимых изменений перфузии. Можно предположить, что увеличение амплитуд сердечных колебаний в положении «лёжа» свидетельствует об усилении артериального притока крови к исследуемой области, а снижение амплитуд нейрогенных и миогенных колебаний на этом фоне выступает в роли механизма компенсации за счёт увеличения тонуса сосудов, препятствуя излишней гиперемии. Ранее аналогичные результаты уже были получены при исследовании влияния на состояние микроциркуляции пассивного ортостатического теста [24]. В работе [25] схожий результат по изменениям нейрогенных колебаний кожи надбровья, измеренным в ортостазе и клиностазе, авторы объясняют расширением артериолярного русла в ответ на действие гравитационных сил, приводящих к снижению перфузионного давления.

Схожая динамика с более высоким значением амплитуды сердечных колебаний также наблюдается в области висков и пальцев рук. В области пальцев рук при этом отсутствуют другие расхождения в амплитудно-частотных спектрах сигналов ЛДФ в положениях «сидя» и «лёжа», но отмечается значимо более высокий ПМ крови при положении «лёжа». В области кожи висков затруднительно проводить анализ амплитудно-частотных характеристик сигнала ЛДФ, поскольку из-за короткой длительности регистрации невозможно оценить значение амплитуд низкочастотных колебаний (эндотелиальных и нейрогенных). Можно предположить, что именно снижение нейрогенного и миогенного тонуса является фактором, защищающим область головы от излишней гиперемии.

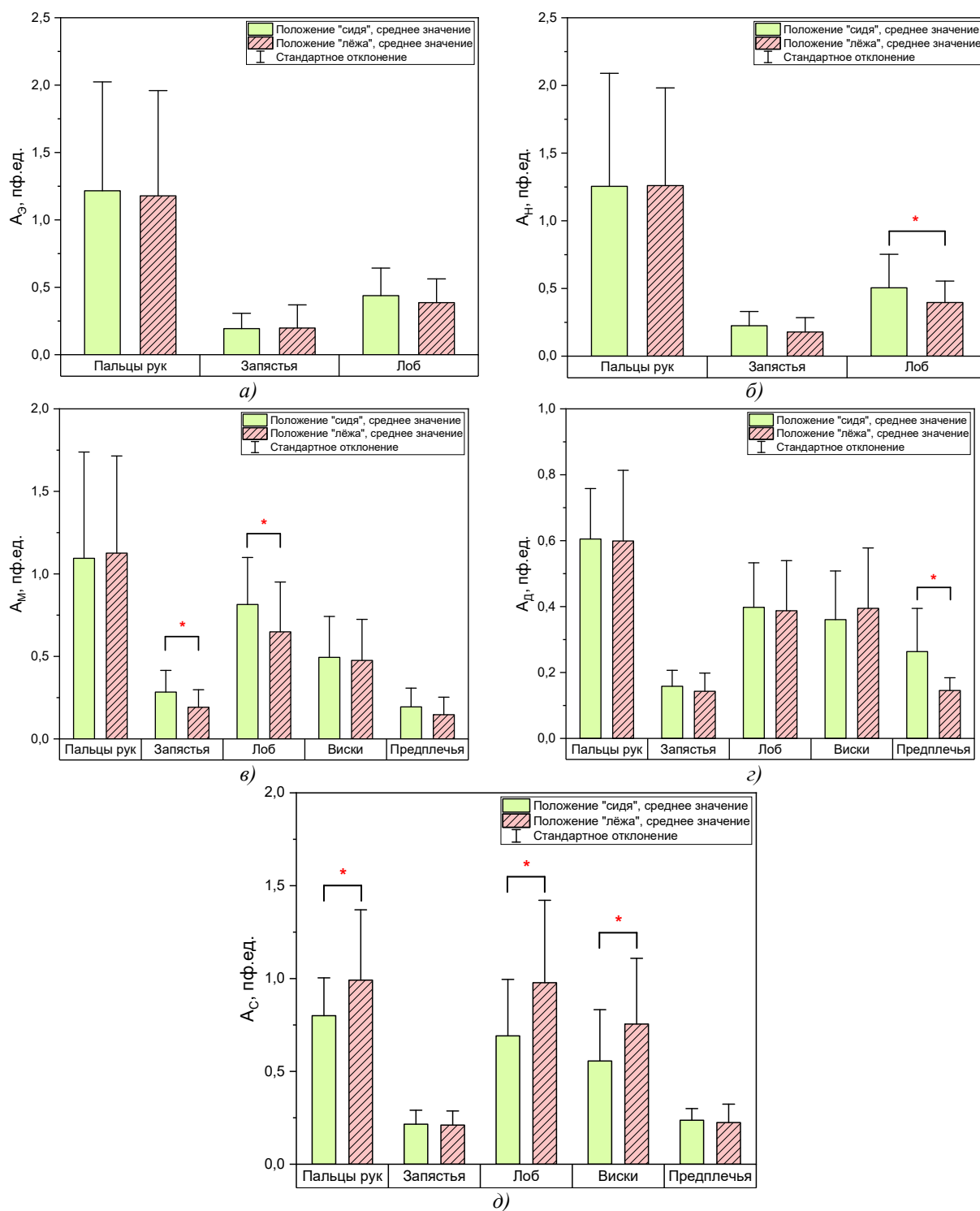


Рисунок 3 – Результаты анализа значений амплитуд: а – эндотелиальных, б – нейрогенных, в – миогенных, г – дыхательных и д – сердечных колебаний кровотока при разном положении тела испытуемого

Параметры микроциркуляции кожи запястья демонстрируют относительную стабильность как в положении «сидя», так и в положении «лёжа», единственным изменяющимся параметром в этой области исследования является амплитуда миогенных колебаний, демонстрирующая статистически значимое снижение в положении «лёжа». Снижение A_M может быть связано с общим снижением перфузии в этой области. В области кожи предплечий отмечается значимое снижение ПМ в положении «лёжа» с одновременным снижением амплитуды дыхательных колебаний. Снижение A_d может указывать на увеличение микроциркуляторного давления [21].

Параметр $A_{НАДН}$ характеризуется стабильностью и не изменяется при смене положения тела в пространстве ни в одной из исследованных областей.

Заключение

В настоящей работе проведён комплексный анализ параметров микроциркуляторно-тканевых систем организма человека в 5-ти разных областях исследования при разном положении тела испытуемого в пространстве с применением портативных мультимодальных анализаторов, реализующих методы ЛДФ и ФС. Получены усредненные значения показателя микроциркуляции крови и амплитуд колебаний кровотока в области кожи лба, висков, дорсальной поверхности нижней трети предплечий, вентральной поверхности нижней трети предплечья, подушечек 3-их пальцев рук в положениях «сидя» и «лёжа», наиболее популярных при составлении протоколов экспериментальных исследований.

Полученные результаты позволяют судить о направлениях изменений параметров микроциркуляции крови при изменении положения тела испытуемого в пространстве. Следует отметить, что изменение положения тела испытуемого в пространстве существенно влияет на регистрируемое значение показателя микроциркуляции, при этом данное влияние имеет разнонаправленный характер в разных областях исследования – переход в положение «лёжа» характеризуется снижением ПМ в области пальцев рук и предплечий и незначительным повышением этого параметра в области кожи лба и висков. Полученные данные и зарегистрированные различия необходимо учитывать в дальнейшем при планировании новых экспериментальных исследований, так как они могут оказывать влияние на полученный результат, в том числе при сравнении испытуемых с нарушениями микроциркуляции крови с условно-здоровыми добровольцами, приводя к неверным результатам сравнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-75-00188).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aksu, U. Microcirculation: current perspective in diagnostics, imaging, and clinical applications [Tezxt] / U. Aksu, B. Yavuz-Aksu, N. Goswami // Journal of Clinical Medicine. – 2024. – Vol. 13. – №. 22. – P. 6762.
2. Rizzoni, D. Microcirculation in hypertension: a therapeutic target to prevent cardiovascular disease? [Text] / D. Rizzoni, C. Agabiti-Rosei, G. E. Boari, M. L. Muiesan, C. De Ciuceis // Journal of Clinical Medicine. – 2023. – Vol. 12. – №. 15. – P. 4892.
3. Дунаев, А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: монография [Текст] / А. В. Дунаев. - Старый Оскол: ТНТ, 2022. - 440 с.: ил.
4. Zharebtsov, E. Novel wearable VCSEL-based blood perfusion sensor [Text] / E. Zharebtsov, S. Sokolovski, V. Sidorov, I. Rafailov, A. Dunaev, E. Rafailov // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). – 2018. – P. 564-564.
5. Zharebtsov, E.A. Wireless dynamic light scattering sensors detect microvascular changes associated with ageing and diabetes [Text] / E.A. Zharebtsov, E.V. Zharkikh, Y.I. Loktionova, A.A. Zharebtsova, V.V. Sidorov, E.U. Rafailov, A.V. Dunaev // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2023. – Vol. 70. – №. 11. – P. 3073-3081.
6. Пат. 2836326 Российская Федерация, МПК A61B 5/1455, A61B 5/026, G01N 21/64. Портативное мультимодальное устройство оптической спектроскопии для диагностики состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека [Текст] / Сидоров В.В., Жарких Е.В., Дунаев А.В.; заявитель и патентообладатель ООО НПП «ЛАЗМА», ООО «Оптическая диагностика». – N 2023126543; заявл. 17.10.2023; опубл 12.03.2025, Бюл. № 8. – 11 с.: ил.
7. Сидоров, В.В. Система локальных анализаторов для неинвазивной диагностики общего состояния компарментов микроциркуляторно-тканевой системы кожи человека [Текст] / В.В. Сидоров, Ю.Л. Рыбаков, В.М. Гукасов, Г.С. Евтушенко // Медицинская техника. – 2021. – Т. 330. – №. 6. – С. 4-6.
8. Фролов, А.В. Реакция микроциркуляции крови в коже различных участков тела при выполнении дыхательных упражнений йоги [Текст] / А.В. Фролов, Ю.И. Локтионова, Е.В. Жарких, В.В. Сидоров, А.В. Танканаг, А.В. Дунаев // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2023. – Т. 22. – № 1. – С. 72-84.
9. Тихомирова, И.А. Возможности портативных лазерных анализаторов в оценке состояния микроциркуляции и ее регуляторных механизмов [Текст] / И.А. Тихомирова, А.А. Коршунова, В.А. Лемехова // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2024. – Т. 23. – № 4. – С. 105-113.
10. Федорович, А.А. Нарушения микроциркуляторного кровотока в коже предплечья в острую фазу COVID-19 по данным лазерной доплеровской флоуметрии [Текст] / А.А. Федорович, Д.С. Марков, М.В. Малишевский, О.О. Юдаков, А.Ю. Горшков, А.В. Балдин, Д.М. Жук, А.Ю. Спасенов, А.И. Королёв, А.В. Коптелов, О.М. Драпкина // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2022. – Т. 21. – № 3. – С. 56–63.
11. Муравьев, А.В. Постокклюзионная реактивная гиперемия у лиц с артериальной гипертензией по данным портативного двухканального лазерного анализатора микроциркуляции крови [Текст] / А.В. Муравьев // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2025. – Т. 24. – № 4. – С. 32–39.
12. Sundberg, S. Acute effects and long-term variations in skin blood flow measured with laser Doppler flowmetry [Text] / S. Sundberg // Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation. – 1984. – Vol. 44. – №. 4. – P. 341-345.

13. Рыжкова, Е.Г. Пространственная гетерогенность перфузии кожи и воспроизводимость результатов лазерной доплеровской флоуметрии с температурными функциональными пробами у здоровых добровольцев [Текст] / Е.Г. Рыжкова, Т.Б. Моргунова, И.А. Рыжков, В.В. Фадеев // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2025. – Т. 23. – №. 4. – С. 30-38.
14. Козлов, В.И. ЛДФ-метрия кожного кровотока в различных областях тела [Текст] / В.И. Козлов, М.В. Морозов, О.А. Гурова // Регионарное кровообращение и микроциркуляция – 2012. – Т. 11. – № 1. – С. 58–61.
15. Loktionova, Y.I. Wearable multimodal optical analyzers: Physiological variability and reproducibility of measurements [Text] / Yu.I. Loktionova, E.V. Zharkikh, V.E. Parshakova, V.V. Sidorov, A.V. Dunaev // Journal of Biophotonics. – 2025. – Vol. 18. – №. 4. – P. e202400527.
16. Rendell, M. Microvascular blood flow, volume, and velocity measured by laser Doppler techniques in IDDM [Text] / M. Rendell, T. Bergman, G. O'Donnell, E.D. Drobny, J. Borgos, R.F. Bonner // Diabetes. – 1989. – Vol. 38. – №. 7. – P. 819-824.
17. Mrowietz, C. Reference range and variability of Laser-Doppler-Fluxmetry [Text] / C. Mrowietz, R.P. Franke, G. Pindur, U. Wolf, F. Jung, // Clinical Hemorheology and Microcirculation. – 2017. – Vol. 67. – №. 3-4. – P. 347-353.
18. Дунаев, А.В. Анализ физиологического разброса параметров микроциркуляторно-тканевых систем [Текст] / А.В. Дунаев, И.Н. Новикова, А.И. Жеребцова, А.И. Крупаткин, С.Г. Соколовский, Э.У. Рафаилов // Биотехносфера. – 2013. – Т. 29. – № 5. – С. 44-53.
19. Ryzhkova, E. Fluorescence spectroscopy with temperature functional tests in the assessment of markers of intracellular energy metabolism: spatial heterogeneity and reproducibility of measurements [Text] / E. Ryzhkova, T. Morgunova, E. Potapova, I. Ryzhkov, V. Fadeyev // Journal of Biophotonics. – 2024. – Vol. 17. – №. 10. – P. e202400294.
20. Дунаев, А.В. Анализ индивидуальной вариабельности параметров в лазерной флуоресцентной диагностике [Текст] / А.В. Дунаев, В.В. Дрёмин, Е.А. Жеребцов, С.Г. Палмер, С.Г. Соколовский, Э.У. Рафаилов // Биотехносфера. – 2013. – Т. 26. – № 2. – С. 39-47.
21. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей [Текст] / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 496 с.
22. Танканаг, А.В. Адаптивный вейвлет-анализ колебаний периферического кровотока кожи человека [Текст] / А.В. Танканаг, Н.К. Чемерис // Биофизика. – 2009. – Т. 54. – № 3. – С. 537–544.
23. Танканаг, А.В. Методы вейвлет-анализа в комплексном подходе к исследованию кожной микрогемодинамики как единицы сердечно-сосудистой системы [Текст] / А.В. Танканаг // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2018. – Т. 17. – №. 3. – С. 33-41.
24. Fedorovich, A. Body Position Affects Capillary Blood Flow Regulation Measured with Wearable Blood Flow Sensors [Text] / A. Fedorovich, Yu. Loktionova, E. Zharkikh, M. Mikhailova, J. Popova, A. Suvorov, E. Zherebtsov // Diagnostics. – 2021. – Vol. 11. – P. 436.
25. Ладожская-Гапеенко, Е.Е. Возможности лазерной доплеровской флоуметрии с использованием ортостатической пробы в оценке функционального состояния микроциркуляции [Текст] / Е.Е. Ладожская-Гапеенко, К.Н. Храпов // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2020. – Т. 19. – № 3. – С. 39-45.

Жарких Елена Валерьевна
Орловский государственный
университет имени И.С.
Тургенева, г. Орёл, Россия
доцент кафедры
«Приборостроение, метрология и
сертификация», научный
сотрудник научно-
технологического центра
биомедицинской фотоники
Россия, г. Орёл, ул.
Комсомольская, 95
E-mail: ev.zharkikh@gmail.com

Локтионова Юлия Игоревна
Орловский государственный
университет имени И.С.
Тургенева, г. Орёл, Россия
аспирант кафедры
«Приборостроение, метрология и
сертификация», стажер-
исследователь научно-
технологического центра
биомедицинской фотоники
Россия, г. Орёл, ул.
Комсомольская, 95
E-mail: loktionovai@yandex.ru

Янушин Вячеслав Сергеевич
Орловский государственный
университет имени И.С.
Тургенева, г. Орёл, Россия
аспирант кафедры
«Приборостроение, метрология и
сертификация», стажер-
исследователь научно-
технологического центра
биомедицинской фотоники
Россия, г. Орёл, ул.
Комсомольская, 95
E-mail: slava.yanushin@bk.ru

Коськин Александр Васильевич
Орловский государственный
университет имени И.С.
Тургенева, г. Орёл, Россия
профессор кафедры
«Информационные системы и
цифровые технологии».
Россия, г. Орёл, ул.
Комсомольская, 95
E-mail: koskin@oreluniver.ru

Дунаев Андрей Валерьевич
Орловский государственный
университет имени И.С.
Тургенева, г. Орёл, Россия
профессор кафедры
«Приборостроение, метрология и
сертификация», ведущий научный
сотрудник научно-
технологического центра
биомедицинской фотоники
Россия, г. Орёл, ул.
Комсомольская, 95
E-mail: dunaev@bmecenter.ru

ZHARKIKH E.V., LOKTIONOVA YU.I., YANUSHIN V.S., KOSKIN A.V., DUNAEV A.V.

ANALYSIS OF REGIONAL DIFFERENCES IN PARAMETERS OF MICROCIRCULATORY-TISSUE SYSTEMS IN DIFFERENT BODY POSITIONS OF THE SUBJECT

Abstract. *This study analyzes regional differences in the parameters of the human microcirculatory-tissue systems at different spatial positions of the subject. The results were obtained in vivo using a distributed system of portable multimodal analyzers implementing laser Doppler flowmetry and fluorescence spectroscopy. A comprehensive data analysis was performed, and the amplitude-frequency spectra of LDF signals were calculated for various topographic and anatomical areas of human skin. The obtained results allow us to assess the directions of changes in the parameters of the microcirculatory-tissue systems with changes in the subjects spatial position.*

Keywords: *Laser Doppler flowmetry, fluorescence spectroscopy, portable multimodal analyzers, distributed analyzer system, microcirculatory tissue systems, wavelet analysis.*

BIBLIOGRAPHY

1. Aksu, U. Microcirculation: current perspective in diagnostics, imaging, and clinical applications [Text] / U. Aksu, B. Yavuz-Aksu, N. Goswami // Journal of Clinical Medicine. – 2024. – Vol. 13. – №. 22. – P. 6762.
2. Rizzoni, D. Microcirculation in hypertension: a therapeutic target to prevent cardiovascular disease? [Text] / D. Rizzoni, C. Agabiti-Rosei, G. E. Boari, M. L. Muiesan, C. De Ciuceis // Journal of Clinical Medicine. – 2023. – Vol. 12. – №. 15. – P. 4892.
3. Dunaev, A.V. Multimodalnaya opticheskaya diagnostika mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem organizma cheloveka: monografiya [Tekst] / A. V. Dunaev. - Saryj Oskol: TNT, 2022. - 440 s.: il.
4. Zhrebtsov, E. Novel wearable VCSEL-based blood perfusion sensor [Text] / E. Zhrebtsov, S. Sokolovski, V. Sidorov, I. Rafailov, A. Dunaev, E. Rafailov // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). –2018. – P. 564-564.
5. Zhrebtsov, E.A. Wireless dynamic light scattering sensors detect microvascular changes associated with ageing and diabetes [Text] / E.A. Zhrebtsov, E.V. Zharkikh, Y.I. Loktionova, A.A. Zhrebtsova, V.V. Sidorov, E.U. Rafailov, A.V. Dunaev // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2023. – Vol. 70. – №. 11. – P. 3073-3081.
6. Pat. 2836326 Rossijskaya Federaciya, MPK A61B 5/1455, A61B 5/026, G01N 21/64. Portativnoe multimodalnoe ustrojstvo opticheskoy spektroskopii dlya diagnostiki sostoyaniya mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem organizma cheloveka [Tekst] / Sidorov V.V., Zharkikh E.V., Dunaev A.V.; zayavitel i patentoobladatel OOO NPP «LAZMA», OOO «Opticheskaya diagnostika». – N 2023126543; zayavl. 17.10.2023; opubl. 12.03.2025, Byul. № 8. – 11 s.: il.
7. Sidorov, V.V. A system of local analyzers for noninvasive diagnostics of the general state of the tissue microcirculation system of human skin [Text] / V.V. Sidorov, Y.L. Rybakov, V.M. Gukasov, G.S. Evtushenko // Biomedical Engineering. – 2021. – Vol. 55. – №. 6. – P. 379-382.
8. Frolov, A.V. Reakciya mikrocirkulyacii krovi v kozhe razlichnyh uchastkov tela pri vypolnenii dyhatelnyh uprazhnenij jogi [Tekst] / A.V. Frolov, YU.I. Loktionova, E.V. Zharkikh, V.V. Sidorov, A.V. Tankanag, A.V. Dunaev // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. – 2023. – T. 22. – № 1. – S. 72-84.
9. Tihomirova, I.A. Vozmozhnosti portativnyh lazernyh analizatorov v ocenke sostoyaniya mikrocirkulyacii i ee reguljatornyh mekhanizmov [Tekst] / I.A. Tihomirova, A.A. Korshunova, V.A. Lemekhova // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. – 2024. – T. 23. – № 4. – S. 105-113.
10. Fedorovich, A.A. Narusheniya mikrocirkulyatornogo krovotoka v kozhe predplechya v ostruyu fazu COVID-19 po dannym lazernoj dopplerovskoj floumetrii [Tekst] / A.A. Fedorovich, D.S. Markov, M.V. Malishevskij, O.O. YUdakov, A.YU. Gorshkov, A.V. Baldin, D.M. Zhuk, A.YU. Spasenov, A.I. Korolev, A.V. Koptelov, O.M. Drapkina // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. – 2022. – T. 21. – № 3. – S. 56–63.
11. Muravev, A.V. Postokklyuzionnaya reaktivnaya giperemiya u lic s arterialnoj gipertenziej po dannym portativnogo dvuhkanalnogo lazernogo analizatora mikrocirkulyacii krovi [Tekst] / A.V. Muravev // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. – 2025. – T. 24. – № 4. – S. 32–39.
12. Sundberg, S. Acute effects and long-term variations in skin blood flow measured with laser Doppler flowmetry [Text] / S. Sundberg // Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation. – 1984. – Vol. 44. – №. 4. – P. 341-345.
13. Ryzhkova, E.G. Prostranstvennaya geterogennost perfuzii kozhi i vosproizvodimost rezultatov lazernoj dopplerovskoj floumetrii s temperaturnymi funkcionalnymi probami u zdorovyh dobrovolcev [Tekst] / E.G. Ryzhkova, T.B. Morgunova, I.A. Ryzhkov, V.V. Fadeev // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. – 2025. – T. 23. – №. 4. – S. 30-38.
14. Kozlov, V.I. LDF-metriya kozhnogo krovotoka v razlichnyh oblastyah tela [Tekst] / V.I. Kozlov, M.V. Morozov, O.A. Gurova // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya – 2012. – T. 11. – № 1. – S. 58–61.
15. Loktionova, Y.I. Wearable multimodal optical analyzers: Physiological variability and reproducibility of measurements [Text] / Yu.I. Loktionova, E.V. Zharkikh, V.E. Parshakova, V.V. Sidorov, A.V. Dunaev // Journal of Biophotonics. – 2025. – Vol. 18. – №. 4. – P. e202400527.

16. Rendell, M. Microvascular blood flow, volume, and velocity measured by laser Doppler techniques in IDDM [Text] / M. Rendell, T. Bergman, G. O'Donnell, E.D. Drobny, J. Borgos, R.F. Bonner // *Diabetes*. – 1989. – Vol. 38. – № 7. – P. 819-824.
17. Mrowietz, C. Reference range and variability of Laser-Doppler-Fluxmetry [Text] / C. Mrowietz, R.P. Franke, G. Pindur, U. Wolf, F. Jung, // *Clinical Hemorheology and Microcirculation*. – 2017. – Vol. 67. – № 3-4. – P. 347-353.
18. Dunaev, A.V. Analiz fiziologicheskogo razbrosa parametrov mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem [Tekst] / A.V. Dunaev, I.N. Novikova, A.I. ZHerebcova, A.I. Krupatkin, S.G. Sokolovskij, E.U. Rafailov // *Biotehnosfera*. – 2013. – Т. 29. – № 5. – S. 44-53.
19. Ryzhkova, E. Fluorescence spectroscopy with temperature functional tests in the assessment of markers of intracellular energy metabolism: spatial heterogeneity and reproducibility of measurements [Text] / E. Ryzhkova, T. Morgunova, E. Potapova, I. Ryzhkov, V. Fadeyev // *Journal of Biophotonics*. – 2024. – Vol. 17. – № 10. – P. e202400294.
20. Dunaev, A.V. Analiz individualnoj variabelnosti parametrov v lazernoj fluorescentnoj diagnostike [Tekst] / A.V. Dunaev, V.V. Dryomin, E.A. ZHerebcov, S.G. Palmer, S.G. Sokolovskij, E.U. Rafailov // *Biotehnosfera*. – 2013. – Т. 26. – № 2. – S. 39-47.
21. Krupatkin, A.I. Funkcionalnaya diagnostika sostoyaniya mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem: kolebaniya, informaciya, nelinejnost: rukovodstvo dlya vrachej [Tekst] / A.I. Krupatkin, V.V. Sidorov. – M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2013. – 496 s.
22. Tankanag, A.V. Adaptivnyj vejvlet-analiz kolebanij perifericheskogo krovotoka kozhi cheloveka [Tekst] / A.V. Tankanag, N.K. CHemeris // *Biofizika*. – 2009. – Т. 54. – № 3. – S. 537-544.
23. Tankanag, A.V. Metody vejvlet-analiza v kompleksnom podhode k issledovaniyu kozhnoj mikrogemodinamiki kak edinicy serdechno-sosudistoj sistemy [Tekst] / A.V. Tankanag // *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya*. – 2018. – Т. 17. – № 3. – S. 33-41.
24. Fedorovich, A. Body Position Affects Capillary Blood Flow Regulation Measured with Wearable Blood Flow Sensors [Text] / A. Fedorovich, Yu. Loktionova, E. Zharkikh, M. Mikhailova, J. Popova, A. Suvorov, E. Zherebtsov // *Diagnostics*. – 2021. – Vol. 11. – P. 436.
25. Ladozhskaya-Gapeenko, E.E. Vozmozhnosti lazernoj dopplerovskoj floumetrii s ispolzovaniem ortostaticheskoy proby v ocenke funkcionalnogo sostoyaniya mikrocirkulyacii [Tekst] / E.E. Ladozhskaya-Gapeenko, K.N. Hrapov // *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya*. – 2020. – Т. 19. – № 3. – S. 39-45.

Zharkikh Elena Valerievna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Associate Professor of the Department «Instrument Engineering, Metrology and Certification», research fellow of Research & Development Center of Biomedical Photonics
Russia, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: ev.zharkikh@gmail.com

Loktionova Yulia Igorevna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Postgraduate Student of the Department «Instrument Engineering, Metrology and Certification», research assistant of Research & Development Center of Biomedical Photonics
Russia, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: loktionovaui@yandex.ru

Yanushin Vyacheslav Sergeevich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Postgraduate Student of the Department «Instrument Engineering, Metrology and Certification», research assistant of Research & Development Center of Biomedical Photonics
Russia, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: slava.yanushin@bk.ru

Koskin Alexander Vasilievich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Professor of the Department «Information systems and digital technologies».
Russia, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: koskin@oreluniver.ru

Dunaev Andrey Valerievich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Professor of the Department «Instrument Engineering, Metrology and Certification», leading researcher of Research & Development Center of Biomedical Photonics
Russia, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: dunaev@bmecenter.ru

© Жарких Е.В., Локтионова Ю.И., Янушин В.С., Коськин А.В., Дунаев А.В., 2026

БУРКОВА Е.В., БУРКОВ Д.В., ОСАДЧАЯ Л.И., БУРКОВА С.Д.

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА ОТ КОТЕЛЬНЫХ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ ГЕЛИОТЕПЛОВОЙ СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ ВЫРАБОТАННЫХ КАРЬЕРОВ

Аннотация. Рассмотрено влияние котельных, обеспечивающих теплоснабжение на окружающую среду, а также на здоровье населения. Определена нагрузка на окружающую среду в результате изменений режима работы котельных и технологии производственного цикла. Учтена разработка эффективных методов снижения уровня загрязнения воздуха от котельных путем одного из существующих методов: внедрения инновационных технологий использования возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: экологическая безопасность, экологический ущерб, вредные выбросы котельных, альтернативная энергетика, гелиоэнергетическая установка.

Введение

Актуальность темы обусловлена растущей проблемой загрязнения атмосферного воздуха не только в промышленных регионах, а также в жилых массивах. Экологическая политика России в последние годы стремительно ужесточается, отражая глобальные тенденции и национальные приоритеты в области охраны окружающей среды [1]. В условиях ужесточения экологических требований к промышленным предприятиям и к объектам жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) особую значимость приобретает поиск альтернативных источников энергии и технологий, позволяющих снизить негативное воздействие на окружающую среду. Одним из основных источников загрязнения являются котельные установки, работающие на ископаемом топливе, которые существенно влияют на качество воздуха и здоровье населения.

В выбросах котельных содержатся следующие опасные компоненты:

- оксиды серы и азота, вызывающие кислотные дожди и раздражающие дыхательные пути;
- твердые частицы (зола, сажа), способные проникать в легкие и вызывать заболевания;
- углекислый газ и другие парниковые газы, способствующие глобальному потеплению;
- тяжелые металлы, накапливающиеся в организме и вызывающие хронические заболевания.
- тяжелые металлы, накапливающиеся в организме и вызывающие хронические заболевания.

По выбросам СО в атмосферу на первом месте стоит автомобильный транспорт. Второе место занимают отопительные котельные, которые на единицу вырабатываемой теплоты выбрасывают в атмосферу в 20 раз больше СО, чем промышленные котельные, и в 50 раз больше, чем ТЭЦ [2,3].

Длительное воздействие загрязненного воздуха от котельных может привести к ряду проблем со здоровьем человека:

- заболевания дыхательной системы (астма, бронхит, пневмония);
- аллергические реакции и кожные заболевания;
- сердечно-сосудистые патологии;
- онкологические заболевания при длительном воздействии;
- снижение иммунитета и общая слабость организма.

Выбросы котельных негативно влияют не только на здоровье людей, но и на экологию в целом:

- загрязнение водоемов и почвы;
- гибель растительности;
- нарушение экологического баланса;
- ухудшение качества воздуха в городах.

Для уменьшения негативного воздействия котельных на атмосферу применяются следующие методы:

1. Модернизация оборудования:

- установка современных фильтров и очистных систем;
- замена устаревшего оборудования на более экологичное;
- внедрение автоматизированных систем контроля выбросов.

2. Оптимизация процессов горения:

- использование более чистого топлива;
- применение технологий газификации;
- контроль параметров горения.

3. Рециркуляция дымовых газов:

- организация систем очистки дымовых газов;
- повторное использование тепла дымовых газов;
- внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ):
 - ✓ переход на возобновляемые источники энергии;
 - ✓ развитие когенерации (совместное производство тепла и электроэнергии).

Только комплексный подход и совместные усилия предприятий, государственных органов и общественности помогут решить проблему выбросов котельных, позволит защитить здоровье населения и сохранить благоприятную экологическую обстановку.

Основная часть

Широкий спектр загрязняющих веществ, выделяющихся при эксплуатации теплогенерирующих объектов ЖКХ и влияющих на окружающую среду, требует проведения исследований экологического состояния селитебных территорий с целью разработки технико-экологических решений по снижению влияния на компоненты окружающей среды. Для этого проводится ряд исследований влияния загрязняющих веществ от различного вида топлива, используемого в котельных установках на окружающую среду и на здоровье населения.

Интегральная оценка влияния токсичных примесей атмосферного воздуха на здоровье людей весьма сложна (таблицы 1,2) [4].

Так же при традиционном теплоснабжении в процессе сгорания углеводородного топлива на экологическое состояние территорий городов влияют аэрополлютанты и терраполлютанты (см. рисунок 1).

Для работы котельных установок так же необходима природная вода, которая должна быть обессолена; при регенерации оборудования образуется сточная вода – гидрополлютанты, которые сбрасываются в канализационную сеть и впоследствии попадают в водные объекты. Для получения тепла извлекаются из литосферы невозобновляемые ресурсы, из атмосферы – кислород и азот [6,7].

В процессе выявления экологического состояния территорий населённых пунктов при воздействии теплогенерирующих объектов ЖКХ, важно определить нагрузку на окружающую среду в результате изменений режима работы котельных и технологии производственного цикла. С ростом числа и мощности теплогенерирующих объектов увеличивается потребление топлива, а также количество выбрасываемых в атмосферу городов твёрдых примесей, токсичных и канцерогенных веществ.

Поэтому проблема защиты воздушного бассейна городов и населённых пунктов от загрязнений котельных и теплогенерирующих предприятий является одной из наиболее острых проблем современности.

Таким образом при сжигании различного вида топлива на объектах энергетики и ЖКХ наглядно прослеживается проблема выбросов от котельных и загрязнение атмосферного воздуха территорий.

Реализация комплексного подхода проблемы выбросов котельных заключается в необходимости разработки эффективных методов снижения уровня загрязнения воздуха от котельных путем одного из существующих методов: внедрения инновационных технологий использования возобновляемых источников энергии. Существующие методы очистки выбросов не всегда обеспечивают требуемый уровень экологической безопасности, а их применение требует значительных финансовых затрат.

В современных условиях особую актуальность приобретает гелиотепловая энергетика, основанная на использовании солнечной энергии. Выработанные карьеры, являющиеся отходами горнодобывающей промышленности, могут стать перспективной площадкой для размещения гелиотепловых станций. Это позволит не только решить проблему утилизации

отходов, но и создать экологически чистую альтернативу традиционным котельным установкам.

Таблица 1 – Влияние среднесуточных концентраций загрязнителей на токсическое состояние атмосферы

Основные вещества, загрязняющие воздушную среду	Класс опасности	Состояние воздушного бассейна при концентрации выше, мг/м ³		
		Вызывает опасение	Опасное	Чрезвычайно опасное
Пыль неорганическая	IV	0,15	0,75	3,75
Сернистый газ	III	0,05	0,2	0,38
Оксид азота	III	0,2	0,255	0,765
Оксид углерода	IV	3,0	5,0	25,0
Углеводороды	IV	1,5	7,5	37,5
Сажа	III	0,05	0,25	1,25
Фенол	III	0,01	0,04	0,16
Свинец	I	0,0007	0,00126	0,00224
Сероводород	II	0,008	0,024	0,072
Сероуглерод	II	0,005	0,015	0,45
Аммиак	IV	0,2	1,0	5,0
Серная кислота	II	0,1	0,3	0,9
Соляная кислота	II	0,2	0,6	1,8
Формальдегид	II	0,012	0,036	0,108
Ртуть	I	0,0003	0,00054	0,00096
Фтористые соединения	II	0,005	0,015	0,045

Таблица 2 – Зависимость между снижением уровня загрязнения атмосферного воздуха и уменьшением заболеваемости

Заболевание	Уменьшение числа заболеваний на 1000 чел	
	с опасного уровня до допустимого	с уровня, вызывающего опасения, до допустимого
Грипп и катар верхних дыхательных путей	292	90
Пневмония	12,1	5,6
Бронхиты	13,6	3,2
Туберкулез органов дыхания	3	1,7
Болезни сердца	2,4	0,5
Гипертоническая болезнь	3,2	2,0

Для решения этой проблемы необходимо:

- исследовать потенциал использования выработанных карьеров для размещения гелиознергетических установок;
- разработать методику оценки эффективности предлагаемого решения;
- предложить комплекс мероприятий по реализации.

Для Крымского региона стоит задача по реконструкции неэффективных теплогенерирующих объектов с целью энергосбережения. Эту задачу можно решить с помощью использования выработанных карьеров.

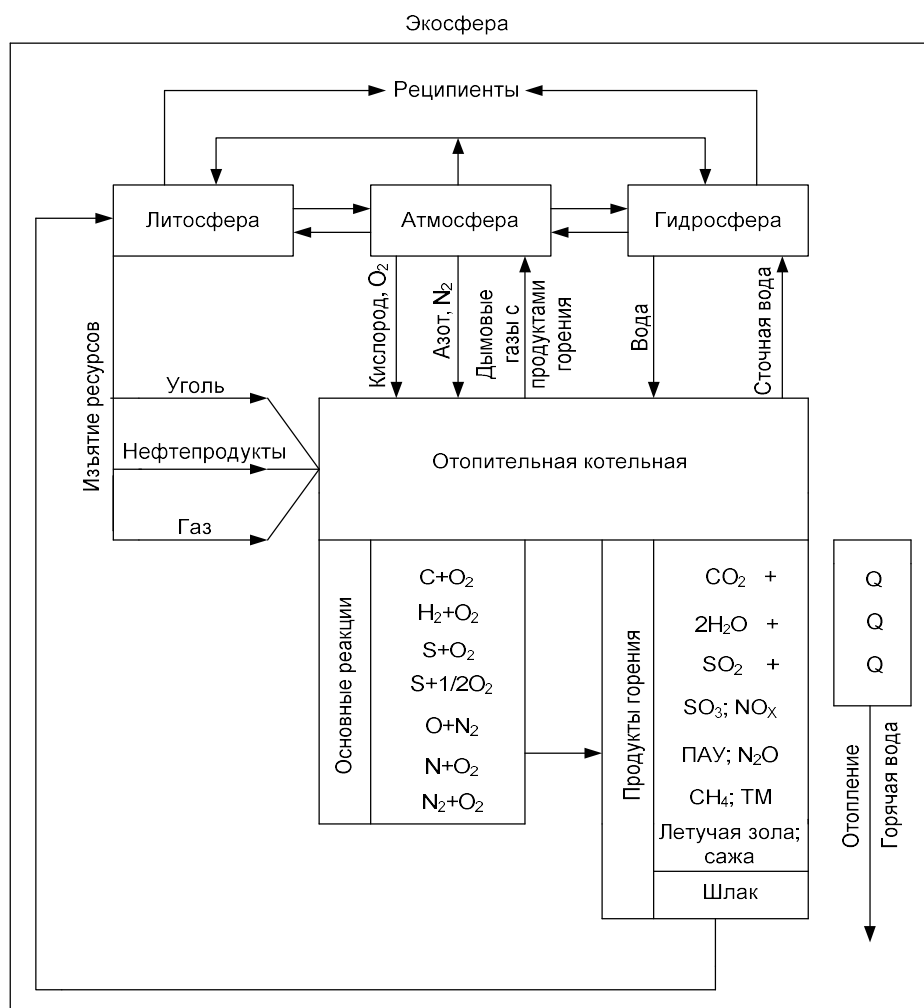


Рисунок 1 – Схема связей технологического процесса выработки тепла при традиционном теплоснабжении с компонентами биосферы (составлена автором)

Выработанные карьеры представляют собой уникальный ресурс, который может быть использован для размещения гелиотепловых станций. Эти территории, ранее использовавшиеся для добычи полезных ископаемых, зачастую обладают рядом преимуществ, делающих их идеальными площадками для солнечных электростанций.

Во-первых, выработанные карьеры обычно располагаются в открытых, незастроенных зонах, что позволяет максимально эффективно использовать солнечное излучение без препятствий в виде зданий или деревьев.

Во-вторых, такие территории часто имеют ровную поверхность, что значительно упрощает процесс установки солнечных панелей и их обслуживания.

Кроме того, размещение гелиоэнергетических установок на месте бывших карьеров способствует восстановлению экосистем и улучшению экологического баланса. Это позволяет не только минимизировать воздействие на окружающую среду, но и создать новые возможности для развития зелёной энергетики.

Потенциал использования выработанных карьеров для размещения солнечных электростанций особенно актуален в регионах с высокой солнечной активностью и недостатком традиционных источников энергии.

Благодаря географическому расположению и климатическим факторам, для Крымского региона перспективным направлением развития ВИЭ является использование потенциала солнечного излучения. Согласно [8] количество поступающей солнечной радиации на территории Крыма составляет в среднем 200-350 Вт/м² в зимнее время и 800-900 Вт/м² в летнее время. Данный потенциал солнечной энергии достаточно высок, и при существующих темпах развития перспективного направления, возможно, что доля солнечной энергетики достигнет 10% энергетического баланса Крыма уже к 2030 году, следовательно, замена

традиционных теплогенерирующих объектов на комбинированные энергосистемы на базе ВИЭ являются актуальным направлением развития энергетики Крыма.

С целью реконструкции систем традиционного теплоснабжения, в плане энергосбережения авторами была разработана модель системы «гелиоколлектор- двухфазный солевой аккумулятор» (см. рисунок 2).

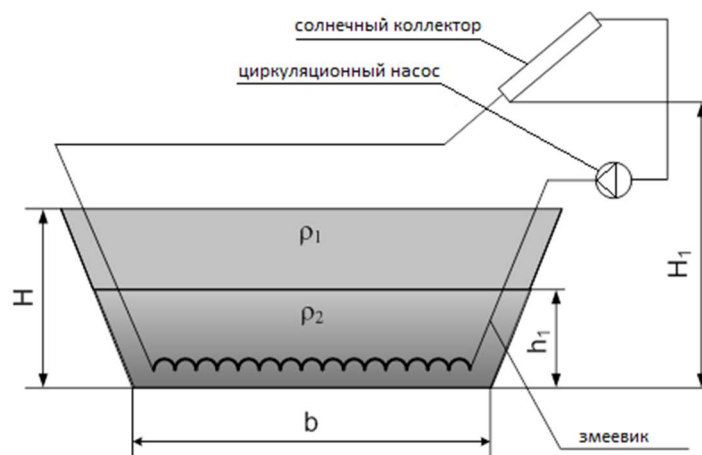


Рисунок 2 – Модель аккумулятора тепловой энергии

Для создания экспериментальной модели системы «гелиоколлектор – двухфазный солевой аккумулятор» использовалась теория подобия. К основным условиям подобия отнесли:

1. Геометрическое подобие модели и объекта.
2. Подобие физических величин, влияющих на процесс.
3. Временное подобие зарядки аккумулятора.
4. Подобие процесса теплопередачи.

Геометрическое подобие заключалось в соблюдении констант инвариантов подобия, которые отражают основные геометрические параметры объекта и модели. К ним относятся:

$$\frac{H_1}{h_1} = \frac{H'}{h'} = idem \quad ; \quad \frac{H}{b} = \frac{H'}{b'} = idem \quad ; \quad \frac{h_1}{H} = \frac{h'_1}{H'} = idem$$

где $H, H_1, b, h_1, H', H'_1, b', h'_1$ – геометрические параметры модели и объекта соответственно.

Разработанная модель представляет собой систему «солнечный коллектор – двухфазный солевой аккумулятор-накопитель», гидравлически соединенные между собой трубопроводами и теплообменником с необходимыми контрольно-измерительными приборами. В качестве солнечного коллектора (СК) применен серийно изготовленный плоский солнечный коллектор. Проведенные натурные испытания системы «солнечный коллектор – двухфазный солевой аккумулятор-накопитель» позволили выявить, что искусственное преобразование солнечной радиации с помощью СК и накопление теплового излучения в аккумуляторе-накопителе приводит к увеличению температуры солевого раствора и аккумулялированию тепловой энергии в нем [9].

Учитывая результаты эксперимента по сезонному аккумулялированию солнечной энергии на основе спроектированной установки, была разработана математическая модель по использованию существующих выработанных карьеров в качестве аккумулятора-накопителя в комплексе с системой СК для обеспечения горячего водоснабжения и отопления городских районов. Главная цель состояла в том, чтобы определить обобщенный коэффициент потерь в окружающую среду. Темп роста температуры солевого раствора в придонном слое аккумулятора за 14 дней составлял 0,51°C/сутки. На 14-й день температура нижнего слоя в солевом растворе стабилизировалась и составляла 29,1°C [10].

Проведенные испытания и дополнительные расчеты показали, что потери аккумулирующей теплоты в окружающую среду составляют 3,5% дневной производительности солнечного коллектора. Данные потери являются приемлемыми при оценке расчетной поверхности гелиополя в процессе проектирования сезонных аккумуляторов солнечной энергии, на основе выработанных карьеров. При самых неблагоприятных климатических условиях (для г. Севастополь) ежедневное пополнение температуры в аккумуляторе будет составлять +0,9°C.

Заключение

Таким образом, выработанные карьеры представляют собой ценный ресурс, который может быть эффективно использован для размещения гелиоэнергетических установок. Это не только способствует развитию возобновляемых источников энергии, но и позволяет решить ряд экологических и экономических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ от 12 мая 2025 г. n 262 «О внесении изменений в требования к содержанию программы производственного экологического контроля, утвержденные приказом министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации» от 18 февраля 2022 г. n 109, и в форму отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля, утвержденную Приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 15 марта 2024 г. n 173.
2. Кабушко А.М. Экология и экономика природопользования: практикум / А.М. Кабушко, Т.Д. Макарецкая. – Мн.: Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2008. – 107 с.
3. Буркова Е. В., Горбатов О.И., Бурков Д. В. Основные принципы создания каскадных гелиоустановок для сезонного горячего водоснабжения / Е. В. Буркова, О.И. Горбатов, Д. В. Бурков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2021. – № 6 (350). – С. 167-171.
4. Макоско А.А. Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы / А. А. Макоско, А. В. Матешева; Российская академия наук. - Москва: Российская акад. наук, 2020. - 257 с.: ил., табл., цв. ил.; 21 см.; ISBN 978-5-907036-71-0: 300 экз.
5. Тимонова Е.Т. Основы экологии и экономика природопользования: пособие для студентов экономических специальностей / Е.Т. Тимонова, И.А. Тимонов. – Витебск: УО «ВГТУ», 2006. – 100 с.
6. Хамзина Ш. Ш Экология и устойчивое развитие / Ш. Ш. Хамзина, Б. К. Жумабекова, Издательство: Академия Естествознания Год издания: 2015 ISBN: 978-5-91327-366-6
7. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман. – М.: Мир, 1977. – 420 с.
8. Буркова Е. В. Использование солнечной энергии для теплоснабжения для объектов индивидуального жилищного строительства / Е. В. Буркова, Д. В. Бурков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2022. – № 4 (354). – С. 101-108.
9. А. А. Велижанин, Р. Д. Мингалеева, В. В. Бессель, А. Ю. Серовайский. Учебно-методическое пособие «Изучение устройства и принципа действия солнечного коллектора» - М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2023.
10. Буркова Е.В., Горбатов О.И., Бурков Д.В. Основные принципы создания каскадных гелиоустановок для сезонного горячего водоснабжения / Е.В. Буркова, О.И. Горбатов, Д.В. Бурков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2021. – № 6 (350). – С. 167-171.

Буркова Елена Викторовна

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Техносферная безопасность»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +79787672889
E-mail: lena1b@mail.ru

Осадчая Лилия Ивановна

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Кандидат географических наук, доцент кафедры
«Техносферная безопасность»
299053, г. Севастополь, Университетская, 33
Тел. +79780113408
E-mail: liosadchaya@mail.sevsu.ru

Бурков Дмитрий Валериевич

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Энергоустановки морских судов и сооружений»
299011, г. Севастополь, ул. Гоголя, 14
Тел. +79787672881
E-mail: dv.burkov@mail.ru

Буркова Снежана Дмитриевна

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Студент группы ТП/6-22-1-о
Институт развития города
299011, г. Севастополь, ул. Гоголя, 14
Тел. +79787672891
E-mail: snezanaburkova460@gmail.com

BURKOVA E.V., BURKOV D.V., OSADCHAYA L.I., BURKOVA S.D.

REDUCING AIR POLLUTION FROM BOILER STOVES BY CREATING A SOLAR HEAT STATION BASED ON EXHAUSTED QUARRIES

Abstract. *The article discusses the impact of boiler houses providing heat supply on the environment, as well as on public health. It identifies the environmental impact resulting from changes in boiler house operation and production cycle technology. The article also considers the development of effective methods to reduce air pollution from boiler houses through the implementation of innovative technologies using renewable energy sources.*

Keywords: *environmental safety, environmental damage, harmful emissions from boiler houses, alternative energy, solar power plant.*

BIBLIOGRAPHY

1. Order No. 262 dated May 12, 2025 "On Amendments to the Requirements for the Content of the Industrial Environmental Control Program, approved by Order No. 109 of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated February 18, 2022, and to the report form on the organization and Results of Industrial Environmental Control, approved by Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 173.2 dated March 15, 2024.
2. Kabushko A.M. Ecology and economics of nature management: a practical course / A.M. Kabushko, T.D. Makaretskaya. – Minsk: Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus, 2008. – 107 p.
3. Burkova E. V., Gorbatykh O. I., Burkov D. V. Basic Principles of Creating Cascade Solar Plants for Seasonal Hot Water Supply / E. V. Burkova, O. I. Gorbatykh, D. V. Burkov // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology – 2021. – No. 6 (350). – Pp. 167-171.
4. Makosko, A. A. Atmospheric Pollution and the Quality of Life in the 21st Century: Threats and Prospects / A. A. Makosko, A. V. Matisheva; Russian Academy of Sciences. - Moscow: Russian Academy of Sciences, 2020. - 257 p.: ill., tables, color ill.; 21 cm.; ISBN 978-5-907036-71-0: 300 copies.
5. Timonova E.T. Fundamentals of Ecology and Economics of Environmental Management: A Guide for Students of Economic Specialties / E.T. Timonova, I.A. Timonov. – Vitebsk: Vitebsk State Technological University, 2006. – 100 p.
6. Khamzina Sh. Sh. Ecology and Sustainable Development / Sh. Sh. Khamzina, B. K. Zhumabekova, Publisher: Academy of Natural Sciences Year of publication: 2015 ISBN: 978-5-91327-366-6
7. Duffy, J.A. Thermal Processes Using Solar Energy. / J.A. Duffy, W.A. Beckman. – Moscow: Mir, 1977. – 420 p.
8. Burkova, E. V. Use of solar energy for heating for individual housing construction / E. V. Burkova, D. V. Burkov // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology – 2022. – No. 4 (354). – Pp. 101-108.
9. A. A. Velizhanin, R. D. Mingaleeva, V. V. Bessel, and A. Yu. Serovaysky. Educational and methodical manual "Studying the device and principle of operation of a solar collector" - Moscow: Publishing Center of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU), 2023.10.
10. Burkova E.V., Gorbatykh O.I., Burkov D.V. Basic principles of creating cascade solar installations for seasonal hot water supply / E.V. Burkova, O.I. Gorbatykh, D.V. Burkov // Fundamental and applied problems of engineering and technology – 2021. – № 6 (350). – Pp. 167-171.

Burkova Elena Viktorovna

Federal State Educational Institution of Higher Education
Sevastopol State University, Sevastopol
Ph.D., associate professor of the Department
«Technosphere safety»
33 Universitetskaya Street Sevastopol, 299053
Тел. +79787672889
E-mail: lena1b@mail.ru

Osadchaya Liliya Ivanovna

Federal State Educational Institution of Higher Education
Sevastopol State University, Sevastopol
Candidate of Geographical Sciences
Associate Professor of the Department
«Technosphere safety»
33 Universitetskaya Street Sevastopol, 299053
Тел. +79780113408
E-mail: liosadchaya@mail.sevsu.ru

Burkov Dmitiy Valerievich

Federal State Educational Institution of Higher Education
Sevastopol State University, Sevastopol
Ph.D., associate professor of the Department
«Power plants of ships and structures»
14 Gogol str., Sevastopol, 299011
Тел. +79787672881
E-mail: dv.burkov@mail.ru

Burkova Snezhana Dmitrievna

Federal State Educational Institution of Higher Education
Sevastopol State University, Sevastopol
Student of group TP/b-22-1-o
Institute of Urban Development
14 Gogol str., Sevastopol, 299011
Тел. +79787672891
E-mail: snezanaburkova460@gmail.com

СОЛДАТКИН В.М., СОЛДАТКИН В.В., ЕФРЕМОВА Е.С.

ПРИЧИНЫ И МОДЕЛИ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ ФЛЮГЕРНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ УГЛОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЛИЯНИЕМ ВИХРЕЙ КАРМАНА

Аннотация. Известна важность достоверной информации об аэродинамических углах атаки и скольжения в системах пилотирования, в системах автоматического управления, в системах предупреждения критических режимов полета самолета и других летательных аппаратов (ЛА) в пределах атмосферы.

Для получения такой информации на самолетах и других ЛА используются флюгерные датчики аэродинамических углов (ДАУ), отличающиеся простотой конструкции и обеспечением требуемой точностью измерения в рабочих диапазонах эксплуатации. Однако, при работе ДАУ на установленный в опорах флюгерный чувствительный элемент датчика воздействуют внешние атмосферные возмущения набегающего воздушного потока, а также вихри Кармана, которые формируются при обтекании и срыве потоков со смежных обтекаемых поверхностей флюгера и приводят к колебаниям флюгера, установленного в набегающем потоке, флюгерного чувствительного элемента и выходного сигнала ДАУ.

Это определяет необходимость теоретического исследования влияния вихрей Кармана на колебания флюгерного чувствительного элемента и выходного сигнала ДАУ, возможности исключения или управляемого уменьшения амплитуды колебаний в рабочих диапазонах эксплуатации ДАУ.

Получены аналитические модели собственного движения флюгерного чувствительного элемента при работе ДАУ, аналитические модели параметров вихрей Кармана флюгера с известной формой профиля и параметрами, их влияния на амплитуду и частоту вынужденных колебаний флюгерного чувствительного элемента при известных параметрах флюгера, установленного в набегающем воздушном потоке.

Полученные результаты позволяют решать задачу исключения или уменьшения амплитуды колебаний флюгерного чувствительного элемента ДАУ, обусловленных влиянием вихрей Кармана, путем использования явления биения аэродинамических сил, действующих на смежные обтекаемые поверхности флюгера.

Ключевые слова: аэродинамический угол, измерение, флюгерный датчик, вихри Кармана, колебания флюгерного чувствительного элемента, причины, модели, возможность исключения, уменьшения амплитуды, явление биения.

Введение.

Полеты самолета и ряда других классов летательных аппаратов осуществляются в приземном слое атмосферы, где их аэродинамические характеристики и уровень безопасности зависят от текущих значений аэродинамических углов атаки и скольжения, определяющих положение вектора истинной воздушной скорости относительно продольной оси ЛА. Поэтому в системах пилотирования, в системах автоматического управления и обеспечения безопасности полета самолета и других летательных аппаратов (ЛА) необходима достоверная информация об аэродинамических углах атаки и скольжения [1 – 4].

Проведенный анализ [5, 6] показывает, что для измерения углов атаки и скольжения на самолетах и других ЛА широко используются флюгерные датчики аэродинамических углов, которые имеют простую конструкцию и обеспечивают требуемую точность измерения в рабочих диапазонах скоростей и высот полета. Однако при работе флюгерного ДАУ на вынесенный в набегающий воздушный поток флюгерный чувствительный элемент кроме внешних атмосферных возмущений набегающего потока оказывают неблагоприятное влияние вихри Кармана [7 – 9], которые формируются при обтекании рабочих поверхностей используемого флюгера и приводят к колебаниям флюгерного чувствительного элемента и выходного сигнала ДАУ с частотой, зависящей от скорости набегающего потока, что затрудняет его обработку в бортовых системах.

Это определяет необходимость проведения исследования причин и моделей влияния вихрей Кармана на колебания флюгерного и чувствительного элемента и выходного сигнала ДАУ, возможности исключения их влияния или управляемого уменьшения амплитуды колебаний в рабочих диапазонах эксплуатации ДАУ.

Аналитические модели динамики углового движения флюгерного чувствительного элемента в режиме измерения аэродинамического угла.

В соответствии с принципом действия флюгерного датчика аэродинамических углов (ДАУ) он включает (рисунок 1) [5, 6] установленный в набегающем воздушном потоке вращающееся в опорах хорошо обтекаемое симметричное тело-флюгер 1, ось симметрии которого при обтекании устанавливается по направлению скорости V набегающего потока. Положение оси симметрии флюгера относительно линии, параллельной продольной оси ЛА, в установившемся режиме определяет величину и знак измеряемого аэродинамического угла α в месте расположения ДАУ на фюзеляже ЛА, который регистрируется выходным устройством 2, формирующим выходной сигнал ДАУ. Масса m_1 разнесенной относительно оси вращения подвижной системы флюгерного чувствительного элемента балансируется грузом 3 с массой m_2 , что устраняет влияние внешних ускорений. Для сглаживания возможных колебаний флюгерного чувствительного элемента используется встроенный демпфер 4.

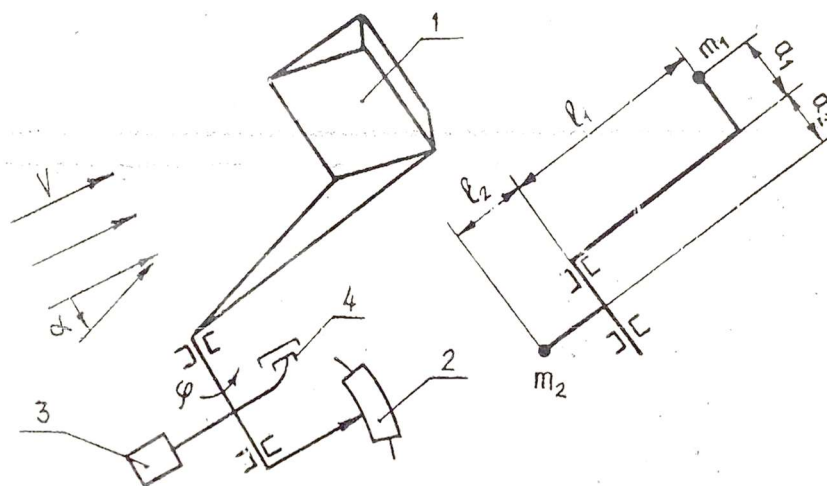


Рисунок 1 – Принципиальная и кинематическая схема флюгерного ДАУ

Без учета влияния трения в опорах подвижной системы, что практически обеспечивается при полете вблизи Земли со скоростью $V \geq 100 \dots 150$ км/ч, аналитическая модель углового движения флюгерного чувствительного элемента будет иметь вид [5, 6]

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + C_d \frac{d\varphi}{dt} + 0,5 C_y^\alpha S l_1 \rho V^2 \varphi(t) = 0,5 C_y^\alpha S l_1 \rho V^2 \alpha(t), \quad (1)$$

где I – момент инерции флюгерного чувствительного элемента (ФЧЭ); $\varphi(t)$ – текущий угол поворота ФЧЭ; C_d – коэффициент демпфирования ФЧЭ, при отсутствии встроенного демпфера коэффициент собственного аэродинамического демпфирования $C_{да}$ определяется моделью $C_{да} = 0,5 C_y^\alpha S l_1 \rho V^2 \alpha(t)$; C_y^α , S – коэффициенты подъемной силы, площадь оперенья флюгера, l_1 – расстояние от линии фокуса профиля флюгера до оси вращения ФЧЭ; $0,5 \rho V^2$ – скоростной напор набегающего воздушного потока; V и ρ – скорость набегающего воздушного потока и массовой плотностью воздуха; $\alpha(t)$ – текущее значение измеряемого аэродинамического угла.

Для получения размерности угловых величин φ и α в единицах градуса необходимо все члены уравнения (1), имеющих размерность углов в радианах, делить на 57,3 и вместо массовой плотности ρ использовать весовую плотность $\rho_B = \frac{\rho}{g}$, где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение

силы тяжести и размерность $\rho_B = \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}$. Тогда аналитическая модель (1) принимает вид

$$I_\Pi \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + C_{дп} \frac{d\varphi}{dt} + 0,5 C_y^\alpha S l_1 \rho_B V^2 \cdot \varphi(t) = 0,5 C_y^\alpha S \rho_B V^2 \alpha(t), \quad (2)$$

где $I_{\Pi} = I / 57,3 \cdot g$ – приведенный момент инерции ФЧЭ, размерность $\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2 / \text{град}$;
 $C_{\text{дп}} = C_{\text{да}} / 57,3 \cdot g$ – приведенный коэффициент аэродинамического демпфирования, размерность $\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{град}$.

С целью упрощения, разделив члены правой и левой частей модели (2) на сомножитель $0,5C_y^a l_1 S \rho_B V^2$ получим аналитическую модель движения подвижной системы ФЧЭ в виде

$$T_2^2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + T_1 \frac{d\varphi}{dt} + \varphi(t) = \alpha(t) \quad (3)$$

$$\text{где} \quad T_1 = \frac{C_{\text{дп}}}{0,5C_y^a l_1 S \rho_B V^2}; \quad T_2 = \sqrt{\frac{I_{\Pi}}{0,5C_y^a l_1 S \rho_B V^2}}. \quad (4)$$

$$\text{Вводя обозначение} \quad \zeta = \frac{T_1}{2T_2} = \frac{C_{\text{дп}}}{2} \sqrt{\frac{0,5C_y^a l_1 S \rho_B V^2}{I_{\Pi}}}, \quad (5)$$

получим аналитическую модель движения ФЧЭ вида

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2\zeta\omega_0 \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \varphi(t) = \omega_0^2 \alpha(t), \quad (6)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{T_2} = \sqrt{\frac{0,5C_y^a l_1 S \rho_B V^2}{I_{\Pi}}}$ – собственная частота недемпфированных колебаний ФЧЭ;

ζ – безразмерный коэффициент затухания (степень успокоения) недемпфированных колебаний ФЧЭ.

Как показывает опыт применения флюгерных ДАУ на самолетах различного класса [6], собственное аэродинамическое демпфирование флюгерного чувствительного элемента не обеспечивает требуемые динамические характеристики ДАУ. С этой целью используется дополнительный встроенный демпфер. При этом с учетом требований по быстродействию и возможного перерегулирования оптимальным значением суммарного коэффициента затухания (успокоения) подвижной системы флюгерного ДАУ является $\zeta_{\text{опт}} = 0,5 \dots 0,7$ [6]. В этом случае суммарный коэффициент демпфирования флюгерного чувствительного ДАУ должно удовлетворять условию

$$C_{\text{дп}} = C_{\text{да}} + C_{\text{дв}} = (0,5 \dots 0,7) \sqrt{2I_{\Pi} C_y^a l_1 S \rho_B V^2}, \quad (7)$$

где $C_{\text{дв}}$ – коэффициент демпфирования дополнительного встроенного демпфера.

Тогда при использовании дополнительного встроенного демпфера динамические характеристики флюгерного чувствительного элемента является круговая частота собственных колебаний задемпфированного флюгерного чувствительного элемента, которая определяется аналитическим выражением

$$\omega_c = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} = \sqrt{\rho_B} V \sqrt{\frac{0,5C_y^a l_1 S}{I_{\Pi}}} \sqrt{1 - \zeta^2}. \quad (8)$$

Динамика движения задемпфированного флюгерного чувствительного элемента ДАУ при изменении аэродинамического угла $\alpha(t)$ будет определяться аналитической моделью вида

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2\zeta_{\text{опт}} \omega_c \frac{d\varphi}{dt} + \omega_c^2 \varphi(t) = \omega_c^2 \alpha(t). \quad (9)$$

Полученная аналитическая модель определяет влияние характера изменения измеряемого аэродинамического угла на динамику движения флюгерного чувствительного элемента, а также влияние на движение ФЧЭ его конструктивных параметров, характеризующих амплитудно-частотные характеристики ФЧЭ. Как будет показано ниже, полученная модель позволяет исследовать влияние вихрей Кармана, возникающих при обтекании флюгера и являющихся причиной вынужденных колебаний ФЧЭ и выходного сигнала ДАУ.

Причины появления и модели параметров вихрей Кармана и их влияния на колебание флюгерного чувствительного элемента и выходного сигнала ДАУ

Под вихрями Кармана принято понимать [7 – 10] процесс формирования и периодического срыва потока со смежных поверхностей обтекаемых тел, установленных в набегающим потоке газа или жидкости и образования за телом так называемых вихревых дорожек Кармана. При этом круговая частота периодического вихреобразования и срыва вихрей Кармана определяется эмпирически полученной зависимостью [10]

$$\omega_{\text{БК}} = \frac{2\pi Sh V}{d_{\text{М}}}, \quad (10)$$

где Sh – безразмерное число Струхала, значение которого находится в интервале $[0,165 – 0,18]$; $d_{\text{М}}$ – размер миделевого сечения, определяющим поверхность срыва потока; V – скорость набегающего потока.

Применительно к флюгерному ДАУ вследствие процесса образования и периодического срыва вихрей со смежных обтекаемых набегающим воздушным потоком рабочих поверхностей флюгера на флюгерный чувствительный элемент будет действовать дополнительная периодическая аэродинамическая сила $F_{\text{БК}}(t)$, обусловленная появлением периодических импульсов давления и повышения давления на смежных обтекаемых поверхностях флюгера при срыве с их поверхностей вихрей Кармана.

Дополнительная периодически изменяющаяся сила $F_{\text{БК}}(t)$, обусловленная вихрями Кармана, приложена в фокусе профиля флюгера и воздействует на флюгерный чувствительный элемент. Значение $F_{\text{БК}}(t)$ определяется соотношением [10]

$$F_{\text{БК}}(t) = (0,05...0,08) S q \sin \omega_{\text{БК}}(t), \quad (11)$$

где $q = 0,5 \rho_{\text{В}} V^2$ – скоростной напор набегающего воздушного потока; $0,05...0,08$ – эмпирически полученные значения в области устойчивого образования вихрей Кармана в интервале чисел Рейнольдса $10^3 < \text{Re} < 1,6 \cdot 10^5$; число Рейнольдса $\text{Re} = \frac{V d_{\text{М}}}{\nu}$, где ν – кинематическая вязкость воздуха, зависящая от барометрической высоты полета.

Тогда вращательный момент аэродинамической силы $F_{\text{БК}}(t)$ от вихрей Кармана, действующий на флюгерный чувствительный элемент будет равен

$$M_{\text{БК}}(t) = F_{\text{БК}}(t) \cdot l_1 = (0,05...0,08) \cdot 0,5 l_1 S \rho_{\text{В}} V^2 \cdot \sin \omega_{\text{БК}} t. \quad (12)$$

Если в правую часть аналитической модели (9) подставить приведенный к размерности град момент $M_{\text{БК}}(t)$, то получим аналитическую модель движения флюгерного чувствительного элемента ДАУ, обусловленное влиянием вихрей Кармана вида

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2\zeta_{\text{опт}} \omega_{\text{С}} \frac{d\varphi}{dt} + \omega_{\text{С}}^2 \varphi(t) = \omega_{\text{С}}^2 \alpha_{\text{БК}}(t), \quad (13)$$

где $\alpha_{\text{БК}}(t) = \varphi_{\text{м}} \sin \omega_{\text{БК}} t$; $\varphi_{\text{БК}}$ – амплитуда колебаний флюгерного чувствительного элемента, обусловленного вихрями Кармана, имеющими амплитуду [10]

$$\varphi_{\text{м}} = \frac{0,05...0,08}{C_y^{\alpha}}. \quad (14)$$

Как показывает анализ, флюгерный чувствительный элемент представляет собой динамическое звено второго порядка с гармоническим воздействием в виде вихрей Кармана. В соответствии с амплитудно-частотной характеристикой динамического звена второго порядка [11] амплитуда $\varphi_{\text{БК}}$ угловых колебаний флюгерного чувствительного элемента, обусловленных влиянием вихрей Карман флюгера, будет определяться аналитической моделью

$$\varphi_{\text{БК}} = \frac{\omega_{\text{С}} \cdot \varphi_{\text{м}}}{\sqrt{\frac{(\omega_{\text{С}}^2 - \omega_{\text{БК}}^2)^2}{\omega_{\text{С}}^2} + 4\zeta_{\text{опт}}^2 \omega_{\text{БК}}^2}}. \quad (15)$$

При использовании временных частот $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$, Гц, $f_{BK} = \frac{\omega_{BK}}{2\pi}$, Гц, аналитическая модель (15) принимает вид

$$\varphi_{BK} = \frac{f_c \cdot \varphi_m}{\sqrt{\frac{(f_c^2 - f_{BK}^2)^2}{f_c^2} + 4\zeta_{opt}^2 f_{BK}^2}}, \quad (16)$$

где

$$f_c = \frac{\sqrt{\rho_B}}{2\pi} V \sqrt{\frac{0,5C_y^a l_1 S}{I_{\Pi}}} \sqrt{1 - \zeta_{opt}^2}, \text{ Гц.} \quad (17)$$

С целью обоснования возможных направлений устранения влияния вихрей Кармана флюгера, используя полученные аналитические модели проведем численные эксперименты на реальном примере флюгерного ДАУ, широко используемого в авиации, построенного на основе классического флюгерного чувствительного элемента с клиновидным флюгером, разнесенным относительно оси вращения, с расчетными параметрами [6]: $C_y^a = 0,04 \frac{1}{\text{град}}$, $d_M = 0,012\text{м}$, $l_1 = 0,052\text{м}$, $S = 24 \cdot 10^{-2}\text{м}^2$, $I_{\Pi} = 8,6 \cdot 10^{-7} \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2/\text{град}$, $\zeta_{opt} = 0,5$ при расчетных значениях скорости набегающего воздушного потока $V = 55,5 \text{ м/с}$ (200 км/ч), барометрической высоте $H = 0$, для которых расчетные значения $f_c = 6,92 \text{ Гц}$, $\varphi_m = 1,25 \dots 2 \text{ град}$, $f_{BK} = 763 \text{ Гц}$, расчетное значение амплитуды колебаний флюгерного чувствительного элемента $\varphi_{BK} = (0,015 \dots 0,06) \text{град}$. Следовательно, при разработке реального флюгерного ДАУ конструктивные параметры флюгера и подвижной системы флюгерного чувствительного элемента из-за существенного различия частоты f_{BK} из-з влияния вихрей Кармана и собственной частоты колебания флюгерного чувствительного элемента амплитуда φ_{BK} колебаний флюгерного чувствительного элемента ниже порога чувствительности ДАУ и не влияет на выходной сигнал флюгерного ДАУ.

Однако, практика эксплуатаций флюгерных ДАУ показывает, что в диапазоне малых рабочих скоростей и высот полета имеют место колебания выходных сигналов образцов флюгерных ДАУ, обусловленных влиянием вихрей Кармана флюгера. Ниже рассматриваются возможные причины и параметры таких колебаний.

Обоснование причины и методика определения параметров возможных колебаний образцов флюгерных чувствительных элементов, обусловленных вихрями Кармана флюгера

Как отмечено выше, процесс формирования вихрей Кармана при обтекании флюгера набегающим воздушным потоком можно представить в виде обтекания и срыва потоков со смежных рабочих поверхностей флюгера. При полной идентичности процесса и параметров обтекания идентичных рабочих поверхностей флюгера вихри Кармана представляют собой гармоническое колебание с амплитудой φ_{BK} и частотой f_{BK} .

В соответствии с технологическими допусками на размеры и форму смежных рабочих поверхностей флюгера размеры и кривизна смежных рабочих поверхностей выполняются с определенной точностью, что является причиной несимметричности их обтекания набегающим воздушным потоком. Характерным примером возможного различия обтекания смежных рабочих поверхностей клиновидного флюгера является отклонение при изготовлении размера r основания клина в одну сторону на величину ΔD (рисунок 2, а), что приводит к увеличению длины l одной (верней) смежной поверхности флюгера на величину Δl и увеличению угла γ обтекания этой смежной поверхности флюгера на величину $\Delta \gamma$. Возникающая при этом несимметрия обтекания флюгера является причиной увеличения размера d_M миделевого сечения обтекаемого клина на величину Δd_M .

Другой причиной нарушения симметрии обтекания на примере клиновидного флюгера является искривления (неплоскостность f) профиля одной смежной рабочей поверхности. Как показано на рисунке 2, б это увеличивает величину пограничного слоя δ одной из обтекаемой

рабочей поверхности, что соответствует увеличению на величину Δd_m размера миделевого сечения флюгера.

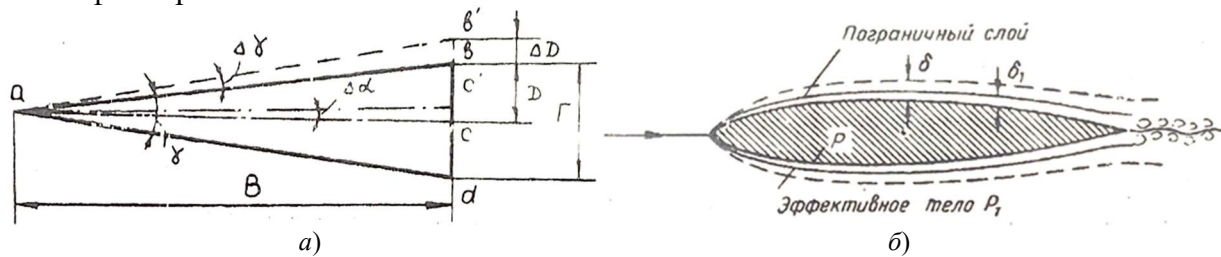


*Рисунок 2 – Характерные причины несимметрии обтекания смежных рабочих поверхностей
клиновидного флюгера*

Рассмотренные и другие возможные причины несимметрии обтекания смежных рабочих поверхностей флюгера приводят к тому, что обтекания смежных рабочих поверхностей происходят с различными интервалами времени t_1 и t_2 срывов потока с их поверхностей и, следовательно, с различными, но близкими частотами ω_1 и ω_2 вихреобразования, а также с амплитудами давлений P_1 и P_2 и сил F_1 и F_2 , действующих на смежные рабочие поверхности флюгера.

Как показывает анализ угловое движение флюгерного чувствительного элемента с несимметрично обтекаемыми смежными рабочими поверхностями, обусловленное при наложении двух гармонически изменяющихся аэродинамических сил F_1 и F_2 и моментов сил M_1 и M_2 , действующих на подвижную систему флюгерного чувствительного элемента с близкими круговыми частотами ω_1 и ω_2 , является нелинейным процессом «биения» [12, 13]. Так как значения круговых частот ω_1 и ω_2 близкие по величине, то их разность $|\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2|$ – малая величина, и частоты суммируемых колебаний, согласно [12], можно выразить через среднее значение $\overline{\omega}$ круговых частот накладываемых колебаний, т.е.

$$\omega_1 = \bar{\omega} - \frac{1}{2}\Delta\omega; \quad \omega_2 = \bar{\omega} + \frac{1}{2}\Delta\omega; \quad \bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2). \quad (18)$$

В этом случае амплитуды суммируемых гармонических аэродинамических сил будут определяться как

$$F_1 = A_1 \cos(\overline{\omega}t - \frac{1}{2}\Delta\omega t); \quad F_2 = A_2 \cos(\overline{\omega}t + \varphi_0 + \frac{1}{2}\Delta\omega t),$$

где A_1 и A_2 – амплитуды гармонически изменяющихся сил F_1 и F_2 ; φ_0 – сдвиг по фазе гармонической силы F_2 относительно силы F_1 .

Как показано в работе [14], результирующая аэродинамическая сила $F(\omega)$, действующая на флюгер при явлении «биения» будет описываться уравнениями

$$F(\omega) = A(t) \cos \Omega t; \quad A^2(t) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\omega t; \quad \Omega \approx \bar{\omega} + \frac{1}{2} \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \Delta\omega. \quad (19)$$

График изменения результирующей негармонической силы $F(\omega)$, действующей на несимметрично обтекаемый флюгер при «биении» аэродинамических сил, будет иметь вид, приведенный на рисунке 3.

Круговая частота $\Delta\omega$, равная разности частот колебаний аэродинамических сил, действующих на несимметрично обтекаемые смежные рабочие поверхности флюгера, называется круговой частотой гармонического колебания биения флюгера с периодом

$$T_{\Delta\omega} = \frac{2\pi}{\Delta\omega}. \text{ Период } T_{\Omega} \text{ осредненной частоты } \overline{\omega} \text{ равен } T_{\Omega} = \frac{2\pi}{\overline{\omega}} = \frac{4\pi}{\omega_1 + \omega_2} = \frac{2\pi}{\omega_{BK}}.$$

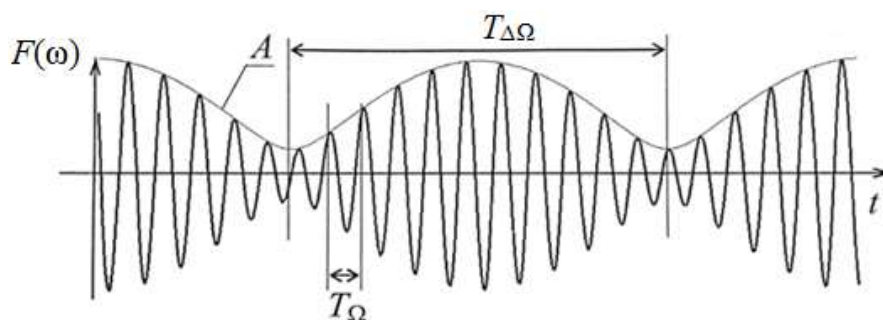


Рисунок 3 – Характер изменение результирующей негармонической силы $F(\omega)$, действующей на флюгер при нарушении симметрии обтекания смежных рабочих поверхностей из-за «биения»

Как показывает анализ полученных результатов, при наличии несимметрии процесса обтекания смежных рабочих поверхностей флюгера происходит модуляция амплитуды колебаний вихрей Кармана по амплитуде гармонического колебания биения. При этом амплитуда A гармонического колебания «биения» за период $T_{\Delta\omega} = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$ медленно изменяется от значения $|A_1 - A_2|$ до значения $A_1 + A_2$, а круговая частота биения $\Delta\omega$ существенно меньше усредненной частоты $\bar{\omega}$ и уже оказывает влияние на колебания флюгерного чувствительного элемента и приводит к колебанию выходного сигнала флюгерного ДАУ.

Применение полученных результатов к процессу «биения» аэродинамических сил, действующих на смежные рабочие поверхности клиновидного флюгера с разнесенной осью вращения, рассматриваемого выше, при наличии несимметрии их обтекания показывает, что частоты срыва вихрей f_1 с несимметричной и f_2 с симметричной смежных рабочих поверхностей, например, из-за изменения Δd_M миделевого размера d_M профиля флюгера, частота биения Δf_{BK} вихрей Кармана, будут определяться соотношениями

$$f_1 = \frac{Sh}{d_M + \Delta d_M} V; \quad f_2 = \frac{Sh}{d_M} V; \quad \Delta f_{BK} = f_2 - f_1 = \left(\frac{Sh}{d_M} - \frac{Sh}{\Delta d_M} \right) V. \quad (20)$$

При этом амплитуда A гармонического колебания «биения» будет близка к амплитуде φ_m вихрей Кармана.

В соответствии с выражением (15) амплитуда φ_{BK} колебаний флюгерного чувствительного элемента с несимметрично обтекаемым клиновидным флюгером, обусловленная влиянием вихрей Кармана, будет определяться выражением

$$\varphi_{BK} = \frac{f_c \varphi_m}{\sqrt{\frac{(f_c^2 - \Delta f_{BK}^2)^2}{f_c^2} + 4\zeta^2 \Delta f_{BK}^2}}. \quad (21)$$

Для апробации методики определения наличия процесса «биения» и полученных математических моделей для определения параметров колебаний флюгерного чувствительного элемента, обусловленных влиянием вихрей Кармана при возникновении биения, проведены расчеты для клиновидного флюгера, с указанного выше конструктивными параметрами при уровне несимметрии обтекания, определяемым значением $\Delta d_M = 0,1$ мм, $d_M = 12$ мм, барометрической высоте $H = 0$ и различных значения скорости V набегающего воздушного потока.

Как показали расчеты, при уровне неидентичности обтекания смежных рабочих поверхностей клиновидного флюгера, определяемый значением $\Delta d_M = 0,1$ мм, в 120 раз меньше размера $d_M = 12$ мм, при изменении скорости набегающего воздушного потока от 50 км/ч до 800 км/ч эффект «биения» не проявляется, амплитуда и частота вихрей близки к амплитуде и частоте вихрей Кармана, которые не воспринимаются флюгерным чувствительным элементом с приведенными выше конструктивными параметрами.

При увеличении уровня несимметрии обтекания одной смежной рабочей поверхности

рассматриваемого клиновидного до уровня $\Delta d_M = 0,2$ мм при значении барометрической высоты $H = 0$ и скорости набегающего воздушного потока $V = 100$ км/ч (27,78 м/с) собственная частота колебаний подвижной системы $f_c = 6,92$ Гц, биение сил на смежных обтекаемых поверхностях имеет место, частота биения $\Delta f_{BK} = 12,76$ Гц, которая воспринимается флюгерным чувствительным элементом и является причиной колебаний флюгерного чувствительного элемента с амплитудой $\Delta f_{BK} = 0,41 \dots 0,66$ град, что приводит к колебанию выходного сигнала флюгерного ДАУ с той же амплитудой и частотой. Как показали расчеты, при увеличении скорости набегающего воздушного потока амплитуда Δf_{BK} флюгерного чувствительного элемента практически не изменяется.

При увеличении барометрической высоты до $H = 5000$ м и скорости набегающего воздушного потока $V = 200$ км/ч (55,5 м/с) значение собственной частоты $f_c = 5,37$ Гц, частота биения вихрей Кармана $\Delta f_{BK} = 13,39$ Гц и амплитуда Δf_{BK} колебаний флюгерного чувствительного элемента уменьшается до значения $\Delta f_{BK} = 0,19 \dots 0,31$ град. При $H = 10000$ м и $V = 200$ км/ч $f_c = 3,9$ Гц, $\Delta f_{BK} = 12,76$ Гц и амплитуда колебаний флюгерного чувствительного элемента уменьшается до значения $\Delta f_{BK} = 0,12 \dots 0,19$ град.

Как показали расчеты, при увеличении уровня несимметрии при одинаковых значениях барометрической высоты и скорости набегающего воздушного потока амплитуда колебаний флюгерного чувствительного элемента также уменьшается.

Заключение

При симметричности формы и параметров смежных обтекаемых рабочих поверхностей и расчетных значениях флюгерного чувствительного элемента вихри Кармана, частота которых значительно (на два порядка) превышает собственную частоту колебаний подвижной системы флюгерного чувствительного элемента, а, следовательно, не воспринимается и вихри Кармана не влияют на его работу.

При возможной несимметрии обтекания смежных рабочих поверхностей флюгера за счет технологических допусков на размеры параметров формы и кривизны смежных обтекаемых рабочих поверхностей флюгера имеет место различие времен срыва вихрей Кармана со смежных обтекаемых поверхностей флюгера и различие круговых частот их вихрей, которые являются причиной «биения» действующих на них аэродинамических сил и моментов сил и возникновения нелинейного явления «биения». Гармоническая составляющая биения вихрей Кармана имеет амплитуду вихрей Кармана, но значительно меньшую частоту, которая воспринимается подвижной системой флюгерного чувствительного элемента и приводит к появлению его колебаний и колебаний выходного сигнала флюгерного ДАУ. Амплитуда колебаний зависит от уровня несимметрии процесса обтекания смежных рабочих поверхностей флюгера, барометрической высоты и скорости набегающего воздушного потока.

Полученные модели колебания «биения» и его влияния на амплитуду и частоту колебаний флюгерного чувствительного элемента являются теоретической основой по обнаружению возникновения гармонических колебаний биения и возможности снижения амплитуды колебаний флюгерного чувствительного элемента и выходного сигнала флюгерного ДАУ с различными видами и формой флюгера, обусловленных влиянием вихрей Кармана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдаткин В.М. Информационно-измерительная система воздушных сигналов летательного аппарата с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока / В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Е.С. Ефремова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 5(362). – С. 52-59.
2. Ефремова Е.С. Модели и анализ погрешностей информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока / Е.С. Ефремова, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 2(370). – С. 148-156.
3. Синяков А.Н. Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками / А.Н. Синяков, Ф.А. Шаймарданов. – М.: Машиностроение. – 1991. – 320 с.
4. Солдаткин В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2001. – 448 с.
5. Солдаткин В.М. Авиационные приборы, измерительно-вычислительные системы и комплексы.

Принципы построения, алгоритмы обработки информации и погрешности / В.М. Солдаткин, Ф.А. Ганеев, В.В. Солдаткин, А.В. Никитин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2014. – 526 с.

6. Клюев Г.И. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов: Учебное пособие / Клюев Г.И., Макаров Н.Н., Солдаткин В.М., Ефимов И.П., под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ. – 2005. – 509 с.

7. Киясбейли А.Ш. Вихревые измерительные приборы / А.Ш. Киясбейли, М.Е. Перельштейн. – М.: Машиностроение. – 1972. – 152 с.

8. Солдаткина Е.С. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с расширенными функциональными возможностями / Е.С. Солдаткина, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2014. – С. 110-116.

9. Ефремова Е.С. Методические и инструментальные погрешности вихревой системы контроля высотно-скоростных параметров полета / Е.С. Ефремова, Р.В. Солдаткин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 2(322). – С. 126-135.

10. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной среды. – М.: Гостехиздат. – 1946. – 168 с.

11. Солдаткин В.М. Основы проектирования измерительных приборов и измерительно-вычислительных систем / В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, А.В. Никитин: Учебное пособие. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2014. – 244 с.

12. Гнусов К.С. Экспериментальное исследование условий возникновения низкочастотной модуляции биения огибающей / К.С. Гнусов, А.П. Савинов // Современная техника и технологии: Труды XIII Междунар. научно-практич. конфер. молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2007. – Т. 2. – С. 316-318.

13. Клименко С.Ю. Математическое моделирование биений, возникающих при суперпозиции акустических сигналов / С.Ю. Клименко, А.П. Савинов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 2. – С. 135-142.

14. Ревинская О.Г. Сложение колебаний биения: Учебно-методическое пособие / О.Г. Ревинская, Н.С. Кравченко. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2022. – 21 с.

Солдаткин Владимир Михайлович
ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский
технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ», г.
Казань,
Профессор кафедры электронного
приборостроения и менеджмента
качества
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10
тел. 8(987)290-81-48
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Солдаткин Вячеслав Владимирович
ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский
технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ», г.
Казань,
Профессор кафедры электронного
приборостроения и менеджмента
качества
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10
тел. 8(917)289-06-75
E-mail: vv-soldatkin@mail.ru

Ефремова Елена Сергеевна
ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский
технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ», г.
Казань,
Доцент кафедры электронного
приборостроения и менеджмента
качества
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10
тел. 8(843)231-03-60
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

SOLDATKIN V.M., SOLDATKIN V.V., EFREMOVA E.S.

REASONS AND MODELS OF OSCILLATION PARAMETERS OF THE FLUGER SENSITIVE ELEMENT OF THE AERODYNAMIC ANGLE SENSOR DUE TO THE INFLUENCE OF THE VORTEX POLE

Annotation. *The importance of reliable information about aerodynamic angles of attack and glide in piloting systems, in automatic control systems, and in warning systems for critical flight modes of aircraft and other aircraft within the atmosphere is well known.*

To obtain such information, aircraft and other vehicles use aerodynamic angle sensors (DAU), which are simple in design and provide the required measurement accuracy in the operating ranges. However, when the DAU is operating, the weather vane sensor element installed in the supports is affected by external atmospheric disturbances of the incoming air flow, as well as by the Karman vortices that are formed during the flow and separation of the air flow from the adjacent streamlined surfaces of the weather vane, causing vibrations of the weather vane, the weather vane sensor element, and the DAU output signal.

This determines the need for a theoretical study of the effect of the Karman vortices on the oscillations of the weather vane sensor element and the output signal of the DAU, as well as the possibility of eliminating or controlling the amplitude of oscillations in the operating ranges of the DAU.

Analytical models of the own motion of the weather vane sensitive element during the operation of the DAU, analytical models of the parameters of the Karman vortices of the weather vane with a known profile shape and parameters of their influence on the amplitude and frequency of the forced oscillations of the weather vane sensitive element with known parameters of the weather vane installed in the incoming air flow, have been obtained.

The obtained results make it possible to solve the problem of eliminating or reducing the amplitude of fluctuations of the DAU weather vane sensitive element caused by the influence of the Karman vortices, by using the

phenomenon of beating of the aerodynamic forces acting on the adjacent streamlined surfaces of the weather vane.

Keywords: *aerodynamic angle, measurement, weather vane sensor, Karman vortices, fluctuations of the weather vane sensor, causes, models, possibility of exclusion, reduction of amplitude, beating phenomenon.*

BIBLIOGRAPHY

1. Soldatkin V.M. Informatsionno-izmeritelnaya sistema vozdushnykh signalov letatel'nogo apparata s integrirovannym fyuzelyazhnym priyemnikom parametrov nabegayushchego vozdushnogo potoka / V.M. Soldatkin, V.V. Soldatkin, E.S. Efremova // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii.* – 2024. – № 5(362). – S. 52-59
2. Efremova E.S. Modeli i analiz pogreshnostey informatsionno-izmeritel'noy sistemy vozdushnykh signalov na osnove ultrazvukovogo metoda kontrolya parametrov nabegayushchego potoka / E.S. Efremova, V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii.* – 2025. – № 2(370). – S. 148-156.
3. Sinyakov A.N. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya LA i ikh silovymi ustanovkami / A.N. Sinyakov, F.A. Shaymardanov. – M.: Mashinostroyeniye. – 1991. – 320 s.
4. Soldatkin V.M. Metody i sredstva izmereniya aerodinamicheskikh uglov letatel'nykh apparatov. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta. – 2001. – 448 s.
5. Soldatkin V.M. Aviatsionnyye pribory, izmeritel'no-vychislitel'nyye sistemy i komplekсы. Printsipy postroyeniya, algoritmy obrabotki informatsii i pogreshnosti / V.M. Soldatkin, F.A. Ganeyev, V.V. Soldatkin, A.V. Nikitin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta. – 2014. – 526 s.
6. Klyuyev G.I. Izmeriteli aerodinamicheskikh parametrov letatel'nykh apparatov: Uchebnoye posobiye / Klyuyev G.I., Makarov N.N., Soldatkin V.M., Yefimov I.P., pod red. V.A. Mishina. – Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU. – 2005. – 509 s.
7. Kiyasbeyli A.SH. Vikhrevyye izmeritel'nyye pribory / A.SH. Kiyasbeyli, M.Ye. Perelshteyn. – M.: Mashinostroyeniye. – 1972. – 152 s.
8. Soldatkina E.S. Vikhrevoy datchik aerodinamicheskogo ugla i istinnoy vozdushnoy skorosti s rasshirennymi funktsionalnymi vozmozhnostyami / E.S. Soldatkina, V.M. Soldatkin // *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika.* – 2014. – S. 110-116.
9. Efremova E.S. Metodicheskkiye i instrumentalnyye pogreshnosti vikhrevoy sistemy kontrolya vysotno-skorostnykh parametrov poleta / E.S. Efremova, R.V. Soldatkin // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii.* – 2017. – № 2(322). – S. 126-135.
10. Blokhintsev D.I. Akustika neodnorodnoy sredy. – M.: Gostekhizdat. – 1946. – 168 s.
11. Soldatkin V.M. Osnovy proyektirovaniya izmeritel'nykh priborov i sistem: Uchebnoye posobiye. / V.M. Soldatkin, A.A. Porunov, V.V. Soldatkin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta. – 2006. – 380 s.
12. Gnyusov K.S. Eksperimentalnoye issledovaniye usloviy vozniknoveniya nizkochastotnoy modulyatsii biyeniya ogibayushchey / K.S. Gnyusov, A.P. Savinov // *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: Trudy XIII Mezhdunar. nauchno-praktich. konfer. molodykh uchenykh.* – Tomsk: Izd-vo TPU. – 2007. – T. 2. – S. 316-318.
13. Klimenko S.YU. Matematicheskoye modelirovaniye biyeny, voznikayushchikh pri superpozitsii akusticheskikh signalov / S.YU. Klimenko, A.P. Savinov // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta.* – 2010. – T. 316. – № 2. – S. 135-142.
14. Revinskaya O.G. Slozheniye kolebaniy biyeniya: Uchebno-metodicheskoye posobiye / O.G. Revinskaya, N.S. Kravchenko. – Tomsk: Izd-vo TPU. – 2022. – 21 s.

Soldatkin Vladimir Mikhailovich
FSBEI HE «Kazan National
Research Technical University
named after A.N.Tupolev-KAI»,
Kazan,
Professor of Department of
Electronic Instrument Making and
Quality Management
420111, Kazan, K.Marksa str,10
Ph. 8(987)290-81-48
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Soldatkin Vyacheslav Vladimirovich
FSBEI HE «Kazan National Research
Technical University named after
A.N.Tupolev-KAI», Kazan,
Professor of Department of Electronic
Instrument Making and Quality
Management
420111, Kazan, K.Marksa str,10
Ph. 8(917)289-06-75
E-mail: vv-soldatkin@mail.ru

Efremova Elena Sergeevna
FSBEI HE «Kazan National
Research Technical University
named after A.N.Tupolev-KAI»,
Kazan,
Associate Professor of Department
of Electronic Instrument Making
and Quality Management
420111, Kazan, K.Marksa str,10
Ph. 8(843)231-03-60
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

© Солдаткин В.М., Солдаткин В.В., Ефремова Е.С., 2026

СОБОЛЕВ Е.В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ КОСИНУСНЫХ КРУГОСИММЕТРИЧНЫХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕЛ

Аннотация. Разработана математическая модель генерации синтетических данных косинусных круглосимметричных фотометрических тел с привязкой к нормируемым характеристикам осветительных приборов и источников света. Модель позволяет получать фотометрические данные в аналитическом и дискретном представлениях. Проведена оценка погрешности моделирования светового потока косинусных круглосимметричных фотометрических тел, исследованы некоторые причины величины и формы распределения погрешности от угла излучения.

Ключевые слова: математическая модель, синтетические данные, фотометрическое тело, косинусное круглосимметричное светораспределение, сила света, световой поток, погрешность модели, кривая силы света, угол излучения.

Введение

Гониофотометрические измерения являются неотъемлемой частью жизненного цикла осветительных приборов (ОП) и источников света. Результаты измерений представляются в виде файлов фотометрических данных (ФФД) в форматах IES и (или) LDT, выступающих на текущий момент стандартом в области моделирования светотехнической части осветительных установок [1]. В открытом доступе находятся более 2.5М ФФД [2], представляющих собой текстовый формат с нормированной структурой [3]. Столь обширный объем данных является привлекательным для анализа, однако не особо подходит в качестве истинных значений при проверке гипотез. Обусловлено это возможностью свободного редактирования ФФД, что приводит к ошибкам в структуре файлов, а также искажению реальных данных у недобросовестных производителей [1, 4]. Фактически нет никакой возможности подтвердить или опровергнуть достоверность информации в ФФД. Также стоит отметить, что ФФД не включают сведения о погрешностях или неопределенностях измерений и реализуют детерминированный подход к описанию светораспределения. Получение статистически достоверных фотометрических данных представляется возможным [5], однако подобные исследования являются трудоемкими, продолжительными и дорогостоящими.

Более рациональной видится проверка гипотез на синтетических данных, полученных при помощи математических моделей, с последующей верификацией на результатах измерений. Генерация искусственных данных является удобным инструментом проверки гипотез, т. к. не требует значительных капитальных вложений и позволяет строить модели с предсказуемыми результатами. В светотехнике данные на основе математических моделей используются как для задач оптимизации распределений освещенности [6, 7], так и для метрологических применений [8, 9]. В приведенных исследованиях проводится оценка целевых показателей без привязки признаков модели к нормируемым характеристикам фотометрических тел (ФТ) ОП, что является актуальной задачей для проверки гипотез в области фотометрии, например, обоснования шага сетки или расстояния фотометрирования.

Цель настоящего исследования – разработка и подтверждение адекватности математической модели генерации синтетических данных косинусных круглосимметричных фотометрических тел с привязкой к нормируемым характеристикам осветительных приборов и источников света.

Аналитическое представление фотометрических данных по косинусной модели светораспределения

При аналитических расчетах косинусная кривая сил света (КСС) может быть представлена в общем виде как [6, 10]:

$$I(\gamma) = I_0 \cdot \cos^n(\gamma) \quad (1)$$

где I_0 – сила света в направлении оптической оси, кд;

n – ламбертовский показатель степени, о. е.;

γ – меридиональный угол в системе фотометрирования (C, γ), град.

Для дальнейших расчетов были приняты значения $\gamma = [0, \pi/2]$ и $n > 0$. Введение данных условий ограничивает излучение светового потока только нижней полусферой и позволяет классифицировать ФТ как светораспределение прямого света (П) [11]. Для получения других классов светораспределения в зависимости от доли светового потока в нижнюю полусферу можно использовать комбинацию двух вариантов КСС, одна из которых повернута на 180° [8].

Практическое значение представляет поиск угла, при котором сила света I составляет определенную долю $p = [0, 1]$ по уровню осевой силы света ($I = p \cdot I_0$). Из уравнения 1 находим:

$$\gamma_p = \arccos(\sqrt[n]{p}) \quad (2)$$

Полученное выражение позволяет осуществить привязку параметров модели к нормируемым характеристикам осветительных приборов и источников света. Частными случаями уравнения 2 являются угол излучения (FWHM, угол половинной яркости) и угол расходимости (FWTM, угол 10% яркости):

$$FWHM = 2 \cdot \gamma_{0.5} = 2 \cdot \arccos(\sqrt[n]{0.5}) \quad (3)$$

$$FWTM = 2 \cdot \gamma_{0.1} = 2 \cdot \arccos(\sqrt[n]{0.1}) \quad (4)$$

Степень n для заданного угла излучения FWHM:

$$n_{FWHM} = \frac{1}{\log_{0.5}(\cos(0.5 \cdot FWHM))} \quad (5)$$

Степень n для заданного угла расходимости FWTM:

$$n_{FWTM} = \frac{1}{\log_{0.1}(\cos(0.1 \cdot FWTM))} \quad (6)$$

Световой поток для косинусного светораспределения (формула 1) в диапазоне меридиональных углов $\gamma = [0, \pi/2]$ определяется зависимостью [10]:

$$F_{0-90} = I_0 \cdot \frac{2\pi}{n+1} \quad (7)$$

где I_0 – сила света в направлении оптической оси, кд;

n – ламбертовский показатель степени, о.е.

По известному показателю степени n (формула 5, 6) можно найти осевую силу света I_0 , при которой световой поток равен заданному значению F (для практических задач часто принимается приведение к световому потоку 1000 лм):

$$I_0 = F \cdot \frac{n+1}{2 \cdot \pi} \quad (8)$$

По известной осевой силе света I_0 найти показатель степени n , при котором световой поток равен заданному значению F :

$$n = \frac{2 \cdot \pi \cdot I_0}{F} - 1 \quad (9)$$

При определении типа кривой силы света светильников рассчитывают коэффициент формы K_f кривой силы света в выбранной характерной меридиональной плоскости по формуле [11]:

$$K_f = \frac{I_{\max}}{I_{av}} \quad (10)$$

где $I_{\max}$ – максимальная сила света исследуемого светораспределения для данной плоскости, кд;

I_{av} – средняя сила света, значение которой определяют для той же плоскости, что и $I_{\max}$, кд.

Для определения среднего значения силы света I_{av} ФТ в данной меридиональной плоскости в интервале меридиональных углов от γ_0 до γ_m используют формулу [11]:

$$I_{av} = \frac{1}{\gamma_m - \gamma_0} \int_{\gamma_0}^{\gamma_m} I(\gamma) d\gamma \quad (11)$$

Для косинусного светораспределения формула примет вид:

$$I_{av} = \frac{I_0}{\gamma_m - \gamma_0} \int_{\gamma_0}^{\gamma_m} \cos^n(\gamma) d\gamma \quad (12)$$

Приведенные выше формулы автоматизированы на языке python в виде программного модуля. Описанные в модуле функции позволяют выстраивать различные варианты решения задачи генерации синтетических данных. Например, на рисунке 1 представлены варианты косинусных КСС для различных углов излучения FWHM, относительно которых рассчитаны остальные параметры светораспределения (показатель степени n для заданного FWHM (формула 5); угол расходимости FWTM по рассчитанному n (формула 4); и т.д.).

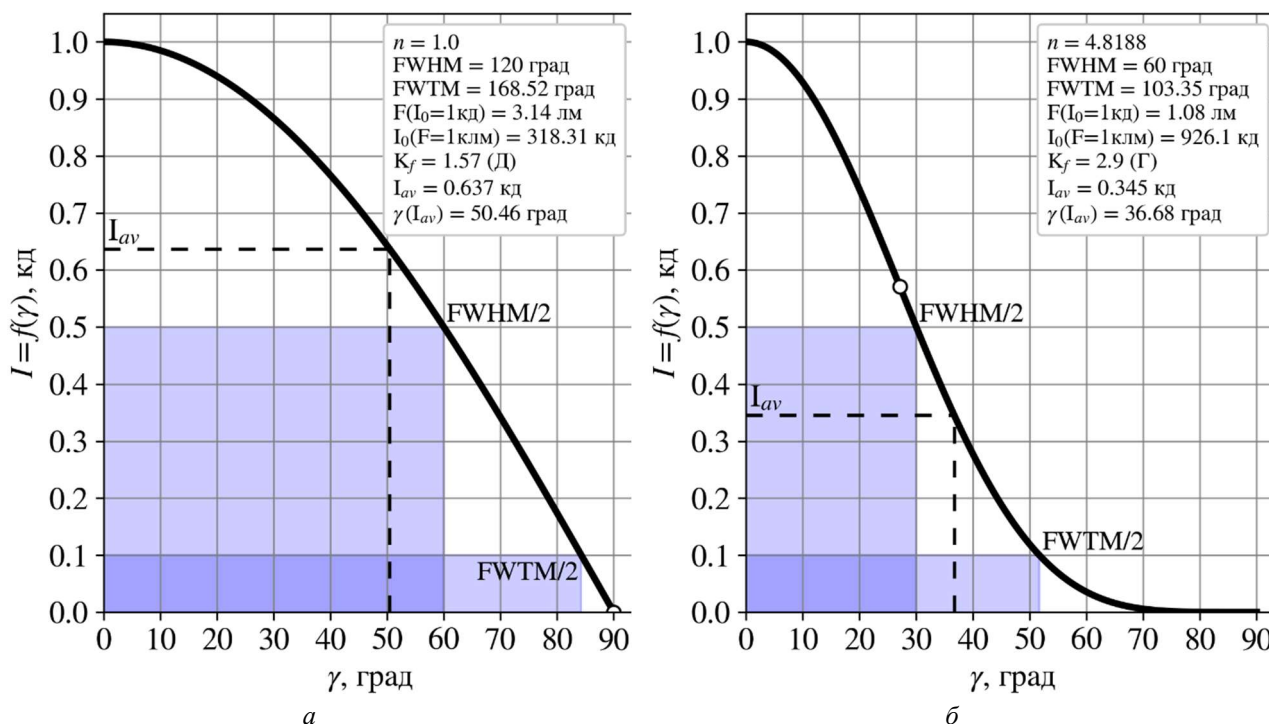


Рисунок 1 – Синтетические данные косинусной модели $I(\gamma) = I_0 \cdot \cos^n(\gamma)$ для различных углов излучения FWHM

n – показатель степени для угла FWHM; FWHM – заданный угол излучения (а – 120, б – 60); FWTM – угол расходимости; F – световой поток при осевой силе света $I_0 = 1$ кд; I_0 – осевая сила света, обеспечивающая световой поток $F = 1000$ лм; K_f – коэффициент формы; I_{av} – средняя сила света; $\gamma(I_{av})$ – угол, для которого сила света равна I_{av} ; ° – точка перегиба

Дискретное представление косинусного светораспределения. Кумулятивная функция

Для генерации дискретных данных по косинусной модели КСС (формула 1), а также перехода от аналитической оценки светового потока (формула 7) к дискретной, т.е. к представлению светового потока в виде суммы зональных световых потоков, необходимо определить сетку меридиональных углов. В работе под одномерной сеткой углов γ будем понимать множество точек G на отрезке $[0, \pi/2]$, таких, что:

$$G = \{\gamma_i = i \cdot \Delta\gamma \mid i = 0, 1, 2, \dots, m-1; \Delta\gamma \in (0, \pi/2)\} \cup \{\gamma_m = \gamma_{m-1} + \Delta\gamma_{m-1} = \pi/2 \mid \Delta\gamma_{m-1} \leq \Delta\gamma\} \quad (13)$$

При данном представлении сетка меридиональных углов однозначно определяется единственным параметром $\Delta\gamma_0 = \Delta\gamma$ – шагом сетки (рисунок 2). Количество шагов сетки m определяется округлением вверх до целого выражения $\pi/(2 \cdot \Delta\gamma)$, число узлов сетки – $m+1$. Для случая, когда последний шаг сетки $\Delta\gamma_{m-1} = \Delta\gamma$ множество точек G определяет классическую

равномерную одномерную сетку [12], для случая $\Delta\gamma_{m-1} < \Delta\gamma$ – неравномерную сетку с шагом отличным от $\Delta\gamma$ только для узла $m-1$.

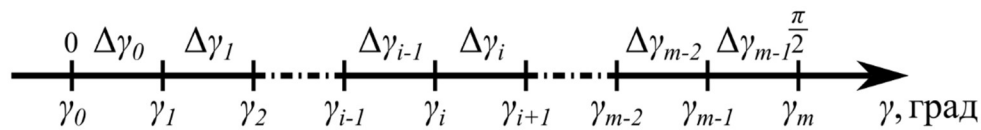


Рисунок 2 – Одномерная сетка углов

При определении светового потока F_i в зональном телесном угле $\Delta\omega_i$, ограниченном меридиональными углами γ_i и γ_{i+1} возможны два подхода: расчет через оценочное значение силы света и аналитическое представление телесного угла (формула 14) [13] или расчет в интегральном представлении (формула 15) [11]. Первый подход подразумевает принятие допущения о постоянстве силы света в пределах рассматриваемого телесного угла, а второй требует наличия аналитического представления КСС. В случае отсутствия аналитической функции КСС интеграл рассчитывается численными методами в узлах заданного телесного угла.

$$F_i = F_{\gamma_i - \gamma_{i+1}} = I_{\omega_i} \cdot \Delta\omega_i = I_{\omega_i} \cdot 2\pi(\cos(\gamma_i) - \cos(\gamma_{i+1})) \quad (14)$$

$$F_i = F_{\gamma_i - \gamma_{i+1}} = 2\pi \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} I(\gamma) \sin(\gamma) d\gamma \quad (15)$$

где I_{ω_i} – оценочное значение силы света в телесном угле, кд;
 $\Delta\omega_i$ – зональный телесный угол, ср;
 γ – меридиональный угол в системе фотометрирования (С, γ), град;
 γ_i – начальный меридиональный угол, град;
 γ_{i+1} – конечный меридиональный угол, град.

Классически в качестве оценки силы света I_{ω_i} в зональном телесном угле принимается сила света для середины зоны $\gamma_i - \gamma_{i+1}$ [13].

В работе для определения опорного (истинного) значения светового потока в телесном угле используется интегральный подход (формула 15). Для косинусного светораспределения выражение примет вид:

$$F_{\gamma_i - \gamma_{i+1}} = 2\pi I_0 \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} \cos^n(\gamma) \sin(\gamma) d\gamma \quad (16)$$

где I_0 – сила света в направлении оптической оси, кд;
 n – ламбертовский показатель степени, о.е.;
 γ – меридиональный угол в системе фотометрирования (С, γ), град;
 γ_i – начальный меридиональный угол, град;
 γ_{i+1} – конечный меридиональный угол, град.

Световой поток фотометрического тела F_{0-90} определяется суммой зональных световых потоков для заданной сетки углов G. Пример распределения зональных потоков для ФТ со световым потоком 1000 лм и углом излучения FWHM = 90° для равномерной сетки с шагом $\Delta\gamma = 5^\circ$ представлен на рисунке 3а. Наибольший вклад в суммарный световой поток ФТ вносят зональные углы в направлениях γ от 30° до 40°, при этом зональный световой поток в области осевой силы света составляет приблизительно 1% от общего светового потока ФТ.

Практический интерес также представляет кумулятивная функция распределения световых потоков (рисунок 3б), позволяющая определить световой поток для телесного угла, ограниченного заданным плоским углом γ (частичный световой поток [14]). Так, для ФТ со световым потоком 1000 лм и углом FWHM = 90° световой поток, ограниченный углом излучения, составляет 646.4 лм (64.6%), а углом расходимости FWTM – 982.7 лм (98.3%).

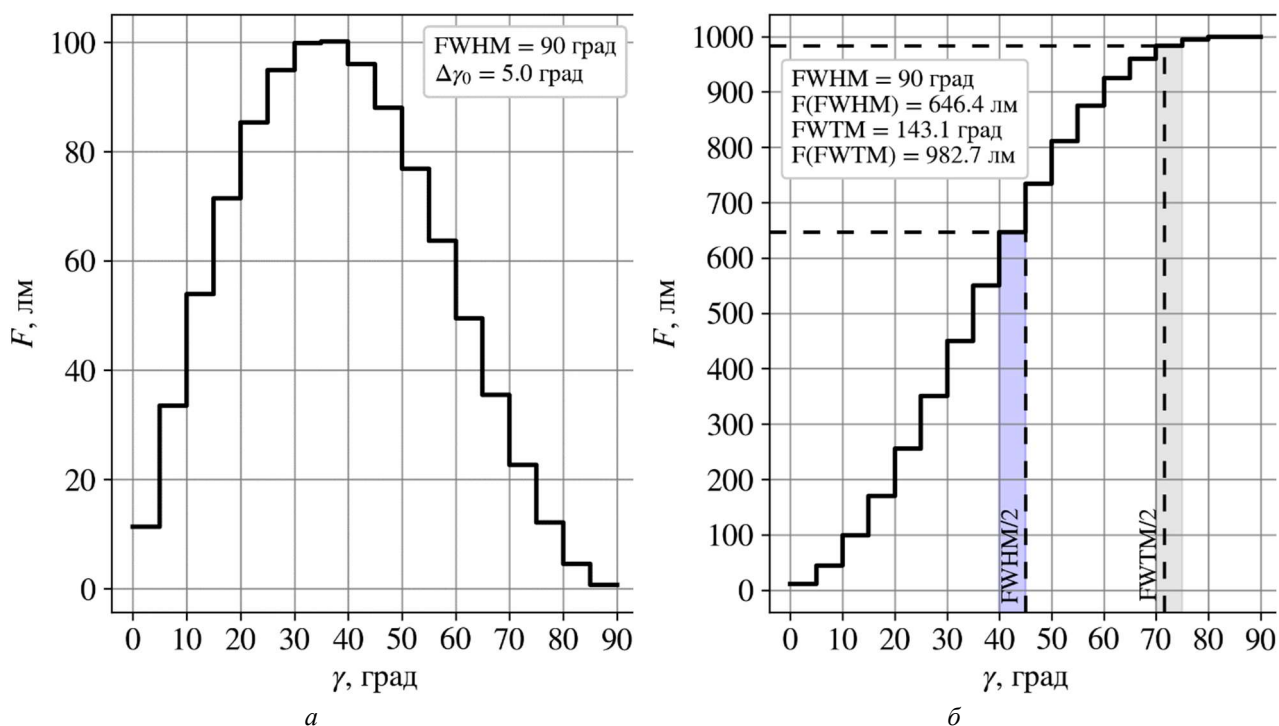


Рисунок 3 – Зональные световые потоки (а) и кумулятивная функция зональных световых потоков (б) косинусной модели $I(\gamma) = I_0 \cdot \cos^n(\gamma)$ для угла излучения $FWTM = 90$ град

FWHM – угол излучения; FWTM – угол расходимости; $\Delta\gamma_0$ – шаг сетки углов; $F(FWHM)$, $F(FWTM)$ – световые потоки в телесных углах, ограниченных плоскими углами $FWHM/2$ и $FWTM/2$ соответственно

Дискретный подход к представлению фотометрических данных позволяет моделировать различные сценарии гониофотометрических измерений, например, тестировать различный шаг сетки и погрешность моделирования.

Оценка погрешности моделирования светового потока косинусных круглосимметричных фотометрических тел

Для последующего использования результатов моделирования синтетических данных в качестве опорных значений необходимо провести оценку погрешности модели. Для оценки точности моделирования светового потока по аналитическим функциям был получен набор данных с объемом выборки в 120 наблюдений. Варьируемым параметром выступал угол излучения FWHM, диапазон изменений параметра от 1 до 120°, шаг изменения угла – 1°. Для каждого угла излучения были рассчитаны: показатель степени n (формула 5); сила света I_0 (формула 8) для светового потока 1000 лм (значение принято за истинное); световой поток по аналитической функции F_{0-90} (формула 7).

Оценка погрешностей осуществлялась апостериорным способом. Абсолютная погрешность оценки светового потока рассчитывалась как разница между результатом моделирования и опорным (истинным) значением:

$$\Delta F = F - F_{ref} \quad (17)$$

где ΔF – абсолютная погрешность оценки светового потока, лм;

F – результат моделирования светового потока, лм;

F_{ref} – опорное (истинное) значение светового потока, лм.

Относительная погрешность оценки светового потока δF – отношение абсолютной погрешности ΔF к опорному (истинному) значению светового потока F_{ref} :

$$\delta F = \frac{\Delta F}{F_{ref}} \quad (18)$$

При оценке погрешностей светового потока по аналитическим функциям в качестве истинного значения был принят световой поток 1000 лм. Результаты моделирования приведены на рисунке 4а. Предельное значение относительной погрешности светового потока,

являющееся верхней оценкой модуля погрешности, составило 2.274×10^{-16} о.е., что вписывается в представление чисел с плавающей точкой двойной точности (15–16 десятичных знаков). Предельное значение абсолютной погрешности – 2.274×10^{-13} лм. Данные погрешности принимаются как постоянные составляющие погрешности для оценки точности моделирования светового потока по аналитическим функциям.

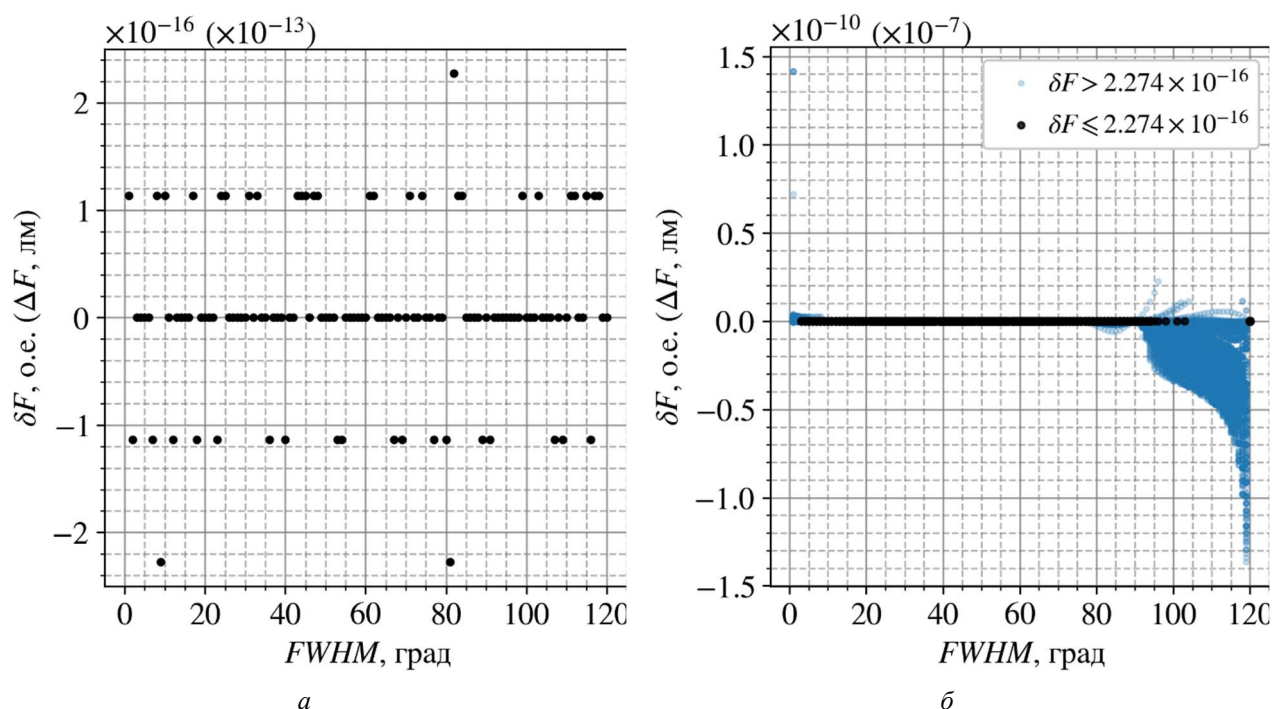


Рисунок 4 – Погрешность оценки светового потока косинусных круглосимметричных фотометрических тел по аналитической функции (а) и при представлении в виде суммы зональных световых потоков (б)

Для оценки точности моделирования светового потока при дискретном представлении был получен набор данных с объемом выборки в 36 000 наблюдений. Варьируемыми параметрами выступали: угол излучения FWHM (диапазон изменений параметра от 1 до 120° , шаг изменения угла – 1°) и шаг сетки углов $\Delta\gamma$ (диапазон изменений параметра от 0.1 до 30° , шаг изменения сетки – 0.1°). Для каждой пары «FWHM – $\Delta\gamma$ » были рассчитаны:

- показатель степени n (формула 5);
- сила света I_0 (формула 8) для светового потока 1000 лм (значение потока принято за истинное);
- световой поток ФТ F_{0-90} (формула 7) по аналитической функции (значение принято за опорное);
- сумма зональных световых потоков (формула 16);
- абсолютная (формула 17) и относительная (формула 18) ошибки оценки светового потока при дискретном представлении относительно истинного и опорного значений.

Установлено, что максимальная разница модулей относительных ошибок оценки суммарного светового потока по истинному и опорному значениям не превосходит 1.137×10^{-16} о.е., т. е. расчет ошибки светового потока относительно опорного значения вносит погрешность на уровне представления чисел с плавающей точкой двойной точности. Следовательно, для дальнейшего анализа выбраны результаты моделирования относительно опорного значения. На рисунке 4б приведена погрешность оценки светового потока косинусных круглосимметричных фотометрических тел при представлении в виде суммы зональных световых потоков с разбивкой на значения больше (55% наблюдений) и не более предельной оценки относительной погрешности светового потока по аналитической функции.

Как видно из рисунка 4б, погрешности оценки светового потока в дискретном представлении имеют значительные отличия от предельной оценки относительной

погрешности светового потока по аналитической функции только для углов излучения менее 10° и более 80° , при этом модуль максимальной относительной погрешности составил 1.415×10^{-10} о.е., модуль максимальной абсолютной погрешности – 1.415×10^{-7} лм. Полученные значения могут быть приняты за постоянные составляющие погрешности при дискретной оценке светового потока, т.к. значительно меньше рекомендуемых погрешностей средства измерения [11], тем не менее целесообразным является определение природы погрешности и возможностей ее управления. В качестве причин увеличения погрешностей были рассмотрены: последовательность суммирования зональных световых потоков, величина шага сетки, точность численного метода интегрирования.

Для анализа влияния накопительной ошибки суммирования были получены световые потоки при обратном и случайном сложении зональных световых потоков. Результаты моделирования не выявили существенных отклонений как в распределении погрешностей, так и в оценке их предельных значений (отношение результатов менее $1.6 \times 10^{-6}\%$).

Т.к. оценка результатов (рисунок 4б) проводилась для всей выборки данных, очевидным является введение фильтра шага углов $\Delta\gamma \leq FWHM$, т. е. исключение наблюдений со значением шага сетки превышающим угол излучения. Введение данного фильтра уменьшает объем выборки до 31 650 наблюдений. Фильтр углов затрагивает только наблюдения менее 30° (рисунок 5а), что согласуется с принятым диапазоном шагов сетки, и изменяет форму распределения погрешности оценки светового потока (рисунок 5б). При этом модули максимальных погрешностей остались без изменений.

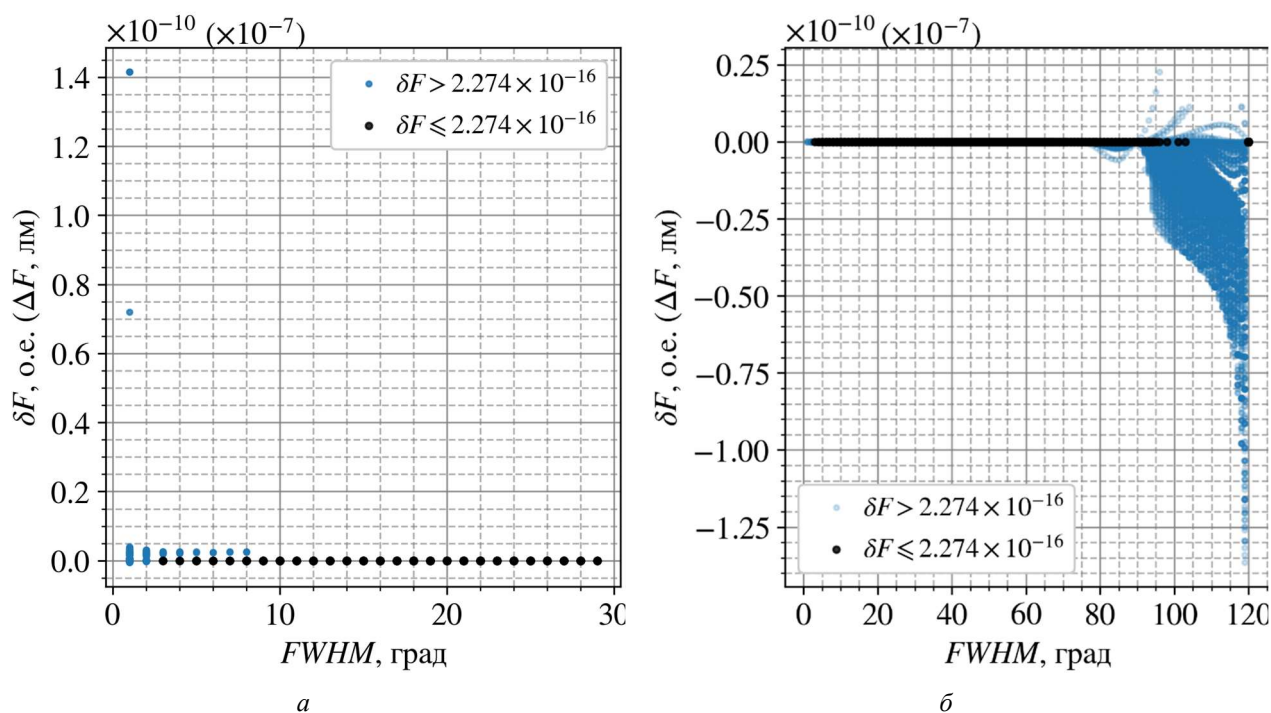


Рисунок 5 – Погрешность оценки светового потока косинусных круглосимметричных фотометрических тел при представлении в виде суммы зональных световых потоков для фильтра шага углов
 а – исключенные из выборки данные ($\Delta\gamma > FWHM$); б – результаты моделирования после коррекции шага сетки ($\Delta\gamma \leq FWHM$)

Для анализа влияния точность численного метода интегрирования было проведено моделирование зональных световых потоков с допустимыми отклонениями в 100 раз меньше исходных значений для интегрирования в пакете *scipy* [15]. Увеличение точности численного метода изменяет форму распределения погрешности оценки светового потока (рисунок 6), а также снижает предельное значение относительной погрешности до 4.880×10^{-11} о.е.

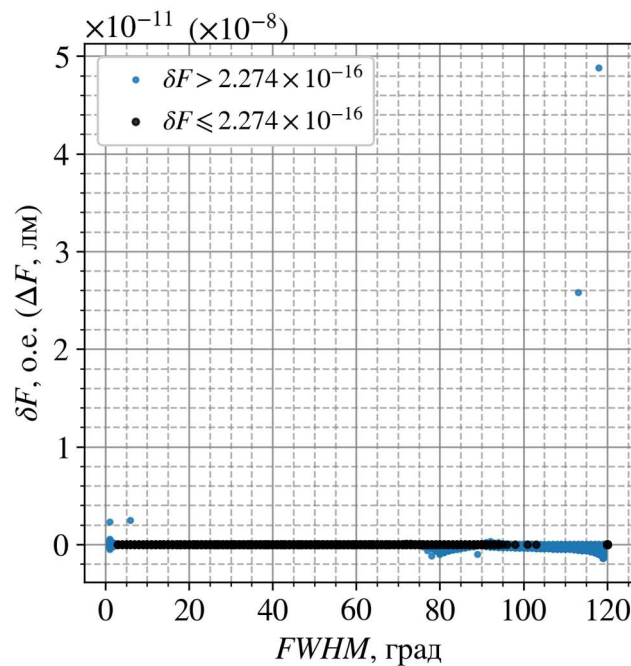


Рисунок 6 – Погрешность оценки светового потока косинусных круглосимметричных фотометрических тел при представлении в виде суммы зональных световых потоков для увеличенной точности численного интегрирования

При дискретном представлении также является важной оценка погрешностей не по всему ФТ, а в отдельно взятом зональном телесном угле. Оценку максимальной абсолютной погрешности зонального светового потока можно получить исходя из правила оценки погрешности сложения приближенных чисел [16], т. к. $\Delta(\sum F_i) = \sum(\Delta F_i)$:

$$\max(\Delta F_i) \leq \Delta F = \Delta(\sum F_i) \quad (19)$$

где ΔF_i – абсолютная погрешность зонального светового потока, лм;

$\Delta(\sum F_i)$ – абсолютная погрешность светового потока ФТ, лм.

Из уравнения 19 следует, что максимальное значение абсолютной погрешности отдельно взятого зонального светового потока не будет превосходить предельное значение абсолютной погрешности светового потока ФТ при дискретном представлении. Следовательно, для предлагаемого дискретного метода моделирования абсолютная погрешность зонального светового потока на полученных данных не будет превосходить $1.415e-7$ лм при исходной точности интегрирования.

Исходя из того, что относительная погрешность суммы положительных слагаемых заключена между наибольшим и наименьшим значениями относительных погрешностей этих слагаемых [16], можно оценить минимальное значение максимальной и максимальное значение минимальной относительных погрешностей зональных световых потоков:

$$\max(\delta F_i) \geq \delta F = \delta(\sum F_i) \quad (20)$$

$$\min(\delta F_i) \leq \delta F = \delta(\sum F_i) \quad (21)$$

где δF_i – относительная погрешность зонального светового потока, о.е.;

$\delta(\sum F_i)$ – относительная погрешность светового потока ФТ, о.е.

Заключение

В исследовании разработана математическая модель генерации синтетических данных косинусных круглосимметричных фотометрических тел в аналитическом и дискретном представлениях. Для получения дискретных данных предложен подход к определению сетки меридиональных углов через единственный параметр – шаг сетки. Разработанная модель позволяет выстраивать различные сценарии генерации фотометрических данных, в том числе на основе нормируемых характеристик осветительных приборов, например, угла излучения (FWHM) или угла расходимости (FWTM).

Проведен анализ погрешностей, который подтвердил адекватность предложенной математической модели и ее программной реализации для генерации фотометрических данных с косинусной формой светораспределения. Были получены предельные значения относительной погрешности светового потока косинусных круглосимметричных фотометрических тел: для оценки по аналитической функции – $2.274e-16$ о.е.; при представлении в виде суммы зональных световых потоков – $1.415e-10$ о.е. Полученные результаты могут использоваться в качестве постоянных составляющих погрешности для последующих исследований, а математическая модель – для генерации опорных (истинных) данных при проверке гипотез в области фотометрии и моделировании светораспределения осветительных приборов и источников света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильина, Е. Исследование причин редактирования файлов фотометрических данных / Е. Ильина, А. Абалов, И. Лебедев // Полупроводниковая светотехника. – 2014. – № 2. – С. 28–32.
2. DIALux Luminaire Finder [Электронный ресурс]. – URL: <https://luminaires.dialux.com/> (дата обращения 30.12.2025).
3. ANSI/IES LM-63-19. IES Standard File Format for the Electronic Transfer of Photometric Data and Related Information [Текст]. – Appr. 06.01.2020. – New York: Illuminating Engineering Society, 2019. – 20 p. – (American National Standard).
4. Ожегова, А. Свет без обмана: зачем светотехнике нужны аккредитованные лаборатории / А. Ожегова, П. Старшинов // Современная светотехника. – 2025. – № 3. – С. 20–23.
5. Solid State Lighting Annex: IC 2017 Interlaboratory Comparison: Final Report / Y. Ohno [et al.]; IEA 4E. – 12/20/2021. – P. 155. – No. IC 2017.
6. Дэй, С. С. Исследование кривых силы света светодиодов для общего освещения / С. С. Дэй, Ц. М. Чань // Светотехника. – 2009. – № 5. – С. 30–36.
7. Гутцайт, Э. Анализ распределения освещенности в ближней зоне от двумерных модулей с повернутыми светодиодами / Э. Гутцайт, В. Маслов // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – № 3. – С. 20–27.
8. Lerch, D. Comparison of Luminous Intensity Distributions / D. Lerch, K. Trampert, C. Neumann // Lux Junior 2021: 15. Internationales Forum Für Den Lichttechnischen Nachwuchs, 04.–06. Juni 2021, Ilmenau: Tagungsband. – 2021. – P. 121–138. – DOI: 10.22032/dbt.49322.
9. Geometric System Analysis of ILMD-based LID Measurement Systems Using Monte-Carlo Simulation / M. Katona [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2149. – IOP Publishing, 2022. – P. 012015.
10. Кнорринг, Г. М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г. М. Кнорринг, И. М. Фадин, В. Н. Сидоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 448 с.
11. ГОСТ 34819-2021. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний [Текст]. – введ. 01.03.2023. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 60 с. – (Межгосударственный стандарт).
12. Рындин, Е. А. Основы численных методов: теория и практика / Е. А. Рындин, И. В. Куликова, И. Е. Лысенко. – Таганрог: ЮФУ, 2015. – 227 с.
13. Епанешников, М. М. Электрическое освещение / М. М. Епанешников. – Изд. 4-е, перераб. – М.: Энергия, 1973. – 352 с.
14. ГОСТ Р 8.971-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Лампы, светильники и модули светодиодные. Методы измерения фотометрических и колориметрических характеристик [Текст]. – введ. 01.04.2020. – М.: Стандартинформ, 2019. – 22 с.
15. SciPy [Электронный ресурс]. – URL: <https://scipy.org/> (дата обращения 11.01.2026).
16. Турчак, Л. И. Основы численных методов: Учебное пособие / Л. И. Турчак, П. В. Плотников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 304 с.

Соболев Евгений Викторович

УО «ГГТУ им. П. О. Сухого», г. Гомель

Младший научный сотрудник НИЛ ТХН

246029, г. Гомель, Пр-т Октября, 48

E-mail: yvsobaleu@gmail.com

SOBOLEV E.V.

MATHEMATICAL MODEL FOR GENERATING SYNTHETIC DATA OF COSINE ROTATIONALLY SYMMETRICAL PHOTOMETRIC BODIES

Abstract. *A mathematical model has been developed for generating synthetic data of cosine rotationally symmetrical luminous intensity distribution with reference to standardized photometric specifications of luminaires and light sources. The model enables to obtain photometric data in both analytical and discrete representations. An assessment of the luminous flux modeling error for cosine rotationally symmetrical photometric bodies was conducted. Some causes of the magnitude and shape of the error distribution as a function of the beam angle were investigated.*

Keywords: *mathematical model, synthetic data, photometric body, cosine rotationally symmetrical light distribution, luminous intensity, luminous flux, model error, luminous intensity distribution, beam angle.*

BIBLIOGRAPHY

1. Ilina, E. Issledovanie prichin redaktirovaniya fajlov fotometricheskikh dannykh / E. Ilina, A. Abalov, I. Lebedev // Poluprovodnikovaya svetotekhnika. – 2014. – № 2. – S. 28–32.
2. DIALux Luminaire Finder [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://luminaires.dialux.com/> (data obrashcheniya 30.12.2025).
3. ANSI/IES LM-63-19. IES Standard File Format for the Electronic Transfer of Photometric Data and Related Information [Tekst]. – Appr. 06.01.2020. – New York: Illuminating Engineering Society, 2019. – 20 p. – (American National Standard).
4. Ozhegova, A. Svet bez obmana: zachem svetotekhnike nuzhny akkreditovannye laboratorii / A. Ozhegova, P. Starshinov // Sovremennaya svetotekhnika. – 2025. – № 3. – S. 20–23.
5. Solid State Lighting Annex: IC 2017 Interlaboratory Comparison: Final Report / Y. Ohno [et al.]; IEA 4E. – 12/20/2021. – P. 155. – No. IC 2017.
6. Dej, S. S. Issledovanie krivykh sily sveta svetodiodov dlya obshchego osveshcheniya / S. S. Dej, Ts. M. Chan' // Svetotekhnika. – 2009. – № 5. – S. 30–36.
7. Gutsajt, E. Analiz raspredeleniya osveshchennosti v blizhnej zone ot dvumernykh modulej s povernutymi svetodiodami / E. Gutsajt, V. Maslov // Poluprovodnikovaya svetotekhnika. – 2012. – № 3. – S. 20–27.
8. Lerch, D. Comparison of Luminous Intensity Distributions / D. Lerch, K. Trampert, C. Neumann // Lux Junior 2021: 15. Internationales Forum Für Den Lichttechnischen Nachwuchs, 04.–06. Juni 2021, Ilmenau: Tagungsband. – 2021. – P. 121–138. – DOI: 10.22032/dbt.49322.
9. Geometric System Analysis of ILMD-based LID Measurement Systems Using Monte-Carlo Simulation / M. Katona [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2149. – IOP Publishing, 2022. – P. 012015.
10. Knorring, G. M. Spravochnaya kniga dlya proektirovaniya elektricheskogo osveshcheniya / G. M. Knorring, I. M. Fadin, V. N. Sidorov. – 2-e izd., pererab. i dop. – SPb.: Energoatomizdat, 1992. – 448 s.
11. GOST 34819-2021. Pribory osvetitel'nye. Svetotekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy [Tekst]. – vved. 01.03.2023. – M.: Rossijskij institut standartizatsii, 2022. – 60 s. – (Mezhhgosudarstvennyj standart).
12. Ryndin, E. A. Osnovy chislennykh metodov: teoriya i praktika / E. A. Ryndin, I. V. Kulikova, I. E. Lysenko. – Taganrog: YuFU, 2015. – 227 s.
13. Epaneshnikov, M. M. Elektricheskoe osveshchenie / M. M. Epaneshnikov. – Izd. 4-e, pererab. – M.: Energiya, 1973. – 352 s.
14. GOST R 8.971-2019. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. Lampy, svetil'niki i moduli svetodiodnye. Metody izmereniya fotometricheskikh i kolorimetricheskikh kharakteristik [Tekst]. – vved. 01.04.2020. – M.: Standartinform, 2019. – 22 s.
15. SciPy [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://scipy.org/> (data obrashcheniya 11.01.2026).
16. Turchak, L. I. Osnovy chislennykh metodov: Uchebnoe posobie / L. I. Turchak, P. V. Plotnikov. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: FIZMATLIT, 2003. – 304 s.

Sobolev Evgeniy Viktorovich

Educational Institution «Sukhoi State Technical University of Gomel»

Junior Researcher of Technical Ceramics and Nanomaterials

246029, Prospect Octiabria, 48, Gomel, Republic of Belarus

E-mail: yvsobaleu@gmail.com

© Соболев Е.В., 2026

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 663/664:620(076.5)

DOI: 10.33979/2073-7408-2026-376-2-212-221

ПАЦОВСКИЙ А.П.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И СПЕКТРОФОТОМЕТРИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КРАСЯЩИХ ПИГМЕНТОВ ЦВЕТКОВ САФЛОРА

Аннотация. На сегодняшний день применение красящих веществ сафлора в России все еще не достаточно широко развито, несмотря на неприхотливость при возделывании этого растения и давно известные целебные свойства. Желтый пигмент представляет собой смесь двух веществ: гидроксисафлора и сафлорового желтого. Пигменты хорошо растворимы в воде, практически не растворимы в спирте и эфире. Красное вещество (картамин) трудно растворимо в воде, но легко растворимо в спирте и щелочах. Показана эффективность и рекомендовано использование фотометрического и хроматографических методов для разделения, идентификации и количественного определения содержания натуральных красящих пигментов в экстрактах из цветков сафлора – желтых пигментов и картамина.

Ключевые слова: сафлор, методы контроля, хроматографический и спектральный анализ, картамин, натуральные красящие вещества, пигмент

Введение и теоретическая часть

В настоящее время для окрашивания пищевых продуктов используются как синтетические, так и минеральные и натуральные компоненты. В синтетических привлекают: доступность, стойкость, интенсивность цвета, относительная дешевизна красителей и, как следствие, уменьшенная себестоимость продукции с включением в состав такого рода ингредиентов. Но есть и негативная сторона вопроса: канцерогенность синтетических продуктов, особенно при частом потреблении, способность вызывать аллергические реакции и влиять на гиперактивность детей. К отрицательной стороне вопроса (для производителей) следует отнести и необходимость размещать на этикетках предупреждение покупателям: «Содержит краситель, который может негативно влиять на активность и внимание детей» [1, 2].

В противоположность синтетическим красителям, натуральные красители не обладают канцерогенным действием и не требуют размещения подобных предупреждений, хотя и уступают синтетическим по цене, стабильности и интенсивности цвета. Тем не менее, в настоящее время ярко выражена тенденция последних двух десятилетий на постепенную замену синтетических красителей на натуральные [3, 4]. И это не может не радовать.

Несколько менее выражена тенденция на увеличение ассортимента разрешенных натуральных красящих пищевых добавок. Это процесс более сложный, требующий проведение комплекса долговременных медико-санитарных и других исследований [5]. Как бы то ни было, из десятков тысяч растений, содержащих красящие вещества, реально для окраски пищевых продуктов по разным причинам используются лишь десятки.

Растение сафлор (*Carthamnus tinctoria* из семейства *Asteraceae*) представляет собой однолетнее растение высотой до 130 см. Удаление венчика лепестка, в свою очередь, не приводит к препятствованию развития семян, с одного посева есть возможность собирать как лепестки, так и семена, получая таким образом и краситель, и масло [6, 7]. До 50-х гг. двадцатого столетия сафлор культивировался в Средней Азии, на Кавказе и на юге Европейской части СССР [8].

Высушенные лепестки сафлора содержат два довольно разных по цвету и свойствам красящих пигмента. Красное вещество сафлора, картамин, в воде трудно растворимо. Не растворяется картамин и в эфире, но зато его легко растворить в спирте и щелочных растворах, например, в нашатырном спирте. Кроме того, в сафлоре содержится и другие красящие пигменты желтого цвета, главным образом гидроксисафлор и сафлоровый желтый.

В статье Смирнова Е.В., посвященной так называемым ингредиентам без Е-индекса [9], куда с полным правом можно отнести и сафлор, приведены сведения об использовании растительного сырья для окрашивания пищевой продукции. В настоящей работе данные из этой статьи, касающимися именно сафлора, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Использование сафлора для окраски различных пищевых продуктов

Наименование, вид	Области применения	Маркировка в составе пищевой продукции
Пищевые ингредиенты с вторичными красящими свойствами зеленого цвета (смесь экстрактов спирулины и сафлора)		
Водорастворимый жидкий	Мороженое, драже, сахарные глазури, экструдированные продукты	Экстракты спирулины и сафлора (или натуральный ароматизатор спирулины и сафлора)
Порошкообразный		
Пищевые ингредиенты с вторичными красящими свойствами синего, коричневого и фиолетового цвета (смеси концентрированного сока из свеклы и экстракта спирулины)		
Водорастворимый порошкообразный	Мороженое, драже, сахарные глазури, экструдированные продукты	Ароматизатор натуральный свекла–сафлор–спирулина
Пищевые ингредиенты с вторичным красящим эффектом желтого цвета		
Водорастворимый, жидкие и порошкообразный	Сахаристые и мучные кондитерские изделия, молочная и молокосодержащая продукция, мороженое, безалкогольные и алкогольные ароматизированные напитки, приправы, соусы, горчица, супы, дрессинги, снеки, фруктовые и овощные полуфабрикаты, фруктовый лед, хлебобулочные изделия	Экстракт сафлора
Жирорастворимый, жидкий	Жировые глазури и начинки	

Как можно видеть, сафлор применяется для окрашивания многих видов пищевой продукции, причем пигменты его могут использоваться как индивидуально, так и в сочетании с другими известными натуральными красящими добавками. Спектр окраски в таком случае расширяется от светло-желтого до фиолетового.

Если брать непосредственно пигмент картамин из сафлора, то в пищевой промышленности он известен как «Натуральный Красный № 26». Его эмпирическая формула $C_{43}H_{42}O_{22}$, идентификатор химических соединений CAS № 75140, молекулярная масса 942,78, а структурная формула показана на рисунке 1.

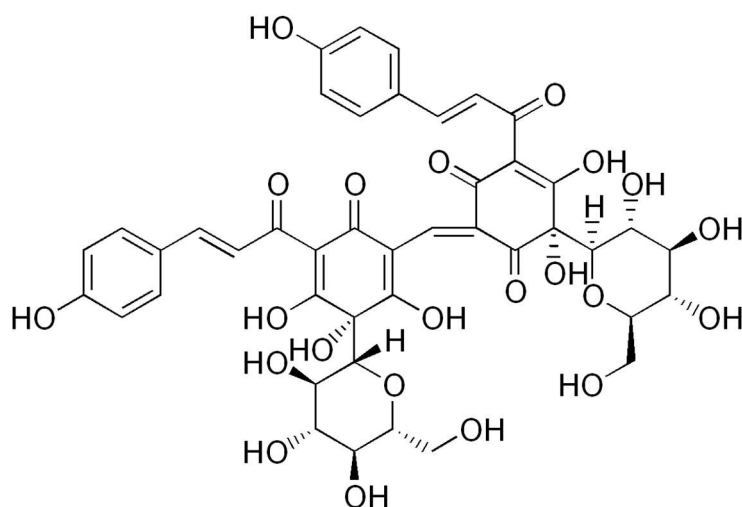


Рисунок 1 – Структурная формула картамина

Что касается собственно ингредиентов без Е-индекса, то стоит сказать следующее: это пищевые ингредиенты, не имеющие числового кода, присвоенного для пищевых добавок

Европейским союзом. Это не значит, что они должны ассоциироваться с понятиями «вредные» или «опасные». В пище они используются как природные красители, усилители вкуса, источники клетчатки и могут быть полезны для здоровья [10].

В последнее десятилетие, в связи с возросшими требованиями Технического регламента Таможенного союза и ужесточением нормативов к качеству пищевых продуктов, в обиходе появился термин «чистая этикетка», применяющийся в маркетинговой практике. Одним из основополагающих требований «чистой этикетки» считается отсутствие в маркировке пищевой продукции синтетических пищевых добавок. В этом свете желтые экстракты натуральных красящих веществ: куркумина, сафлора и желто-оранжевый экстракт паприки, поступающие на российский рынок в виде водорастворимых порошкообразных и жирорастворимых жидких добавок, являются предпочтительными для окрашивания широкого ассортимента пищевой продукции [11].

Кроме красящих свойств сафлора красильного нельзя не упомянуть его использование как масличной культуры. Сафлоровое масло насыщено триглицеридами дважды ненасыщенной линолевой кислотой (70 %) и трижды ненасыщенной линоленовой кислоты (10 %), которые сами не могут быть синтезированы в организме [12, 13].

Экстракция красителей из сафлора – многостадийный процесс, требующий кропотливого и бережного отношения к сырьевому материалу. В патенте [14] этот процесс описан так: для получения концентрата желтого красителя из сафлора, высушенные цветки экстрагируют дистиллированной водой, затем водный экстракт упаривают до (10–15) % сухого вещества, добавляют изопропиловый спирт для осаждения балластных веществ и фильтруют осадок. Полученный после фильтрации раствор снова упаривают для получения концентрата красителя...

В работе [15] описаны эффективные способы выделения красящих веществ из лепестков цветов сафлора. Предполагается обработка сырья в ультразвуковой ванне с максимальной частотой колебаний 35 кГц и мощностью ультразвукового воздействия 160 Вт. Экстракцию проводили дважды раствором карбоната натрия при перемешивании на магнитной мешалке в течение тридцати мин. Экстракт фракционировали на целлюлозе в кислой среде при pH 2,5–5,5. Концентрацию красящих веществ определяли спектрофотометрическим методом: желтых – при длине волны 400, красных – в диапазоне 525–535 нм. В той же работе изучено и влияние размера частиц сырья (от 0,25 до 1,00 мм), продолжительности (от 0 до 90 мин) и мощности (от 48 до 96 Вт) ультразвукового воздействия на экстракцию биофлавоноидов. Оптимальными оказались следующие условия: измельчение сырья до размера не более 0,25 мм (дальнейшее измельчение приводит к увеличению продолжительности экстракции и ухудшению разделения твердой и жидкой фаз); продолжительности ультразвукового воздействия не более 60 мин (при дальнейшем воздействии наблюдается деградация красящих веществ).

Что касается методов разделения пигментов сафлора, то эта тема и по сей день не нашла должного освещения в научной литературе. Исключением можно считать статью китайских исследователей [16], получивших методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с обращенными фазами качественное определение картамина с удовлетворительными хроматографическими характеристиками пика. Помимо ВЭЖХ, для разделения пигментов сафлора хорошо зарекомендовала себя хроматография в тонком слое сорбента (ТСХ) [1, 10]. Преимущество этого метода в его доступности, наглядности процесса разделения и возможности контролировать его в режиме онлайн, принимая во внимание различие по цветовой гамме разделяемых компонентов. Для подтверждения результатов хроматографического исследования, ввиду отсутствия стандартных образцов, возможно параллельное использование спектрофотометрических данных (сравнение известных максимумов поглощения индивидуальных красящих компонентов цветков сафлора) [10]. Важно также отметить, что в России разработано и успешно продается аналитическое оборудование для ТСХ, позволяющее получать количественные данные. Например, для этой цели может быть применена система блока ввода изображений прибора для ТСХ «Денскан» с программной денситометрической обработкой хроматографической пластины «Dens» [1, 17].

Основная часть

Для проведения исследования использовалось растительное сырье (лепестки сафлора), выращенное на опытной станции «Донская» Краснодарского края (Россия), и в Узбекистане. Образцы предоставлены ВИР им. Вавилова. Всего исследованы двадцать образцов растительного сырья. В отсутствии стандартных образцов красителей из сафлора, в качестве образца сравнения был взят промышленно выпускаемый образец экстракта картамина (производитель «*IMANERB BIOTECH*») с заявленной массовой долей картамина 20 %.

Предварительно растительный материал измельчался на лабораторной мельнице до размера ~ 0,3–0,5 мм.

Экстракцию проводили следующим образом:

- растительный материал трижды экстрагировался дистиллированной водой, а затем упаривался до высокой концентрации, но не досуха;
- полученный водный экстракт обрабатывался изопропиловым спиртом для удаления примесей, фильтровался и снова упаривался;
- остатки лепестков обрабатывались аммиачным раствором, в котором хорошо растворим красный пигмент картамин;
- на последней стадии картамин экстрагировался из щелочного раствора с раствором лимонной кислоты при pH 2,5–3,0.

Последнюю операцию имеет смысл повторить, если стоит цель получения индивидуального красителя картамина для удаления остаточных количеств желтых пигментов.

Для увеличения процентного выхода пигментов допускалось кратковременное УЗ-воздействие на экстракты (20 кВт, 2–3 раза в течение 1 мин).

Концентрат красящих веществ упаривался до 10–15 % сухого вещества. Выход целевого продукта составил ~ 35 % в пересчет на 1 кг цветков сафлора.

Пигменты из экстрактов лепестков сафлора: желтой, желто-оранжевой, оранжевой и оранжево-красной окраски исследовались спектрофотометрическим и хроматографическим методами.

Используемое оборудование:

- двухлучевой сканирующий спектрофотометр UV-1800 *SHIMADZU*. Диапазон 190–1100 нм, щель 1 нм.
- пластины для ТСХ «*Sorbfil*» (10 · 10) см;
- кювета для ТСХ;
- микрошприц МШ-1, 1 мкл;
- система блока ввода изображений прибора для ТСХ «Денскан» с программной денситометрической обработкой хроматографической пластины «*Dens*»;
- ультразвуковая ванна «*Branson*».

Установлено, что характер спектра напрямую зависит от окраски лепестков сафлора (Рисунок 2).

В ряду желтый – оранжевый – красный возрастает составляющая картамина, о чем свидетельствует наличие пика при 520 нм. У всех образцов наблюдаются характерные максимумы поглощения при длине волны 395 нм (сафлоровый желтый) и 520 нм (картамин), за исключением образцов с желтой окраской, в которых красный пигмент – картамин отсутствовал (рисунок 3).

Методами спектрофотометрического и ТСХ-анализа идентифицированы три пигмента: сафлоровый желтый, гидроксисафлор и картамин. Результаты исследования приведены в таблице 2.

Результаты спектрофотометрического исследования подтверждаются результатами ТСХ-анализа (Рисунок 4). Для разделения пигментов опробовалось несколько систем элюентов:



Рисунок 2 – Окраска венчика сафлора – от желтовато-белой до оранжево-красной

- 1) пиридин : изоамиловый спирт : изобутиловый спирт : этиловый спирт : вода (3 : 3 : 3 : 4 : 4);
- 2) пиридин: изоамиловый спирт : изобутиловый спирт : этиловый спирт : аммиак (3 : 3 : 3 : 4 : 4);
- 3) изопропиловый спирт : этиловый спирт : вода : муравьиная кислота (3 : 3 : 4 : 4);
- 4) изобутиловый спирт : этиловый спирт : вода : пиридин (3 : 3 : 4 : 4);
- 5) изобутиловый спирт : этиловый спирт : вода: муравьиная кислота (3 : 3 : 4 : 4).

Наилучшее разделение получалось при использовании систем 4 и 5.

Картамину, при использовании системы 4 соответствует значение показателя R_f , равное 0,67, гидроксисафлору 0,60, сафлоровому желтому 0,54 (Рисунок 4).

Для количественного определения красящих пигментов (по объему пятен) использовалась система блока ввода изображений прибора для ТСХ «Денскан» с программной денситометрической обработкой хроматографической пластины «Dens». При этом учитывается не только площадь пятна, но и его интенсивность (количество точек на дюйм).

Растворы сравнения готовились путем кратного разбавления промышленно выпускаемого образца экстракта картамина, «ИМАHERB БИОТЕХ». Концентрации растворов сравнения красящих пигментов (25, 50, 100 и 200 ppm). На стартовую линию пластины для ТСХ микрошприцом наносились растворы сравнения и разбавленный раствор исследуемого образца. Концентрации растворов сравнения красящих пигментов и исследуемого красителя (x ppm) в программу обработки данных «Dens» вводились вручную. Окрашенная зона картамина в исследуемом образце x и зоны картамина в растворах сравнения (1, 2, 3, 4) показаны на рисунке 5.

Вычисленное с помощью программной денситометрической обработки содержание картамина в образце 18 составило $(11,0 \pm 0,5) \%$ от общей массы экстракта. В образцах 8–20 это значение варьировалось от 4 до 10 %.

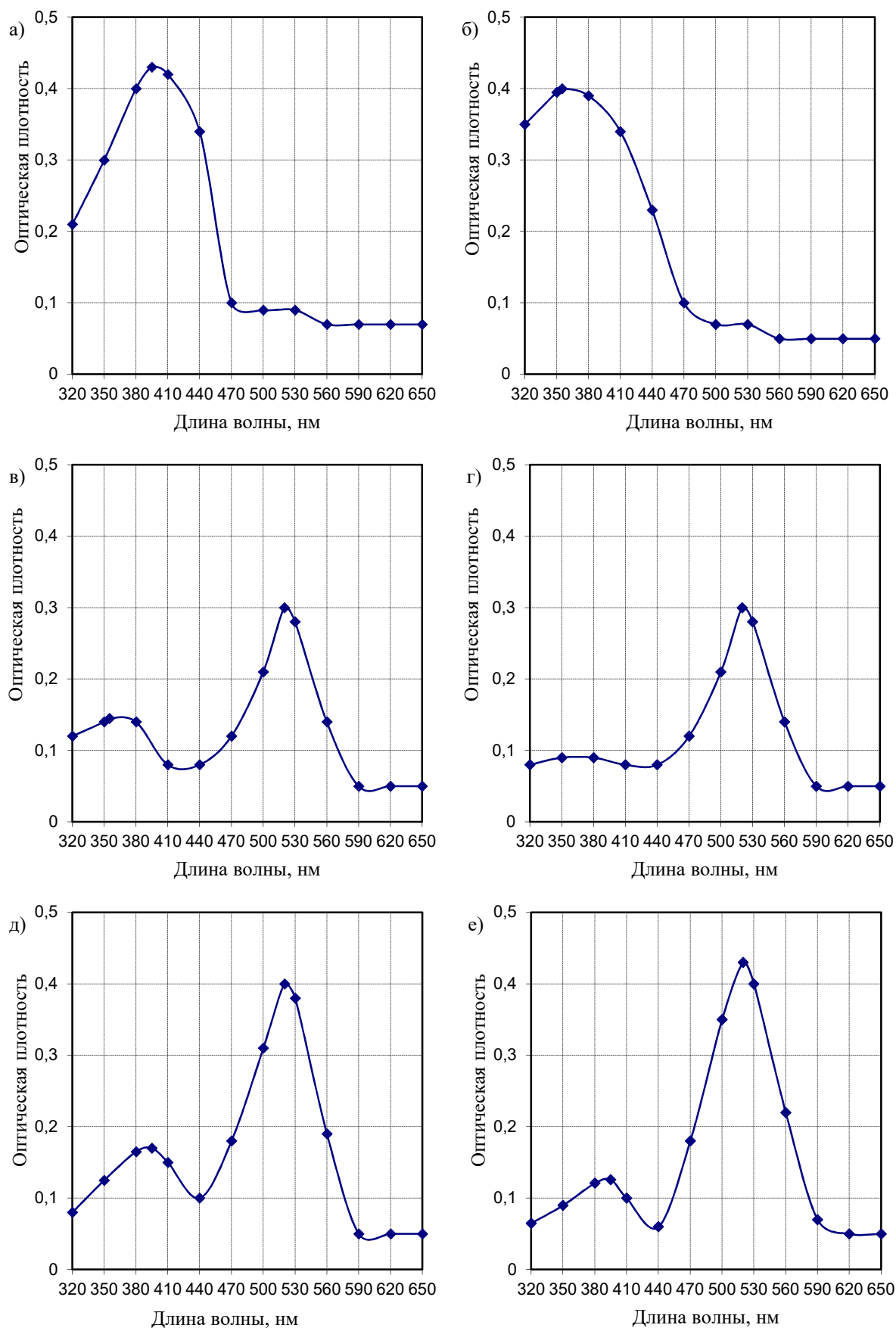


Рисунок 3 – Спектры: а) водного экстракта образца 3; б) водного экстракта образца 5; в) аммиачного экстракта образца 8; г) повторного аммиачного экстракта образца 8; д) аммиачного экстракта образца 13; е) аммиачного экстракта образца 19

Таблица 2 – Результаты спектрофотометрического исследования экстрактов лепестков сафлора

Образцы лепестков	Образцы	Максимум светопоглощения в области (320–650) нм
Желтые	1–3	395 (сафлоровый желтый)
	4–7	355 (гидроксисафлор)
Желто-оранжевые	8–11	395 (сафлоровый желтый) – в водном экстракте; 520 (картамин) – в аммиачном экстракте
Оранжевые	12–17	
Оранжево-красные	18–20	

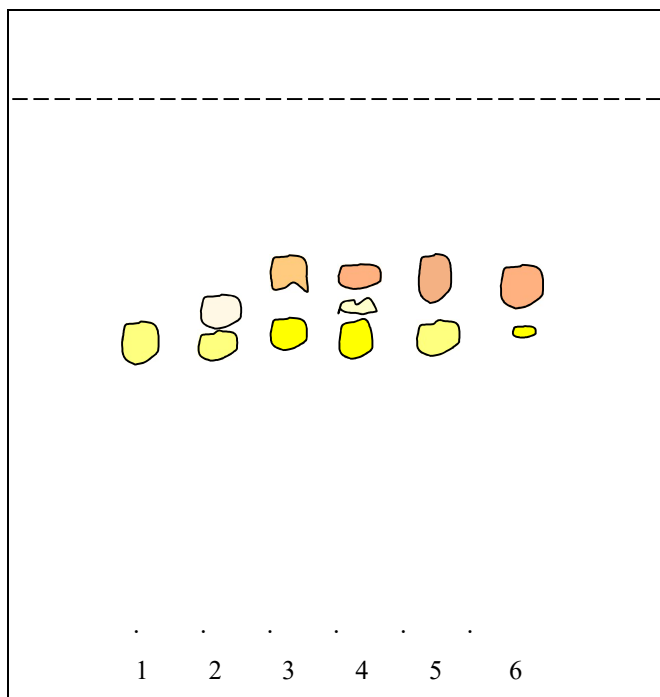


Рисунок 4 – Хроматографическое разделение красящих пигментов (картамина $R_f=0,67$, гидроксисафлора 0,60, сафлорового желтого 0,54) из лепестков сафлора на системе элюентов 4: 1) образца 3 (водный экстракт); 2) образца 5 (водный экстракт); 3) образца 9 (объединенный водно-аммиачный экстракт); 4) образца 13 (объединенный водно-аммиачный экстракт); 5) образца 18 (аммиачный экстракт); 6) образца 18 после повторной экстракции из аммиака

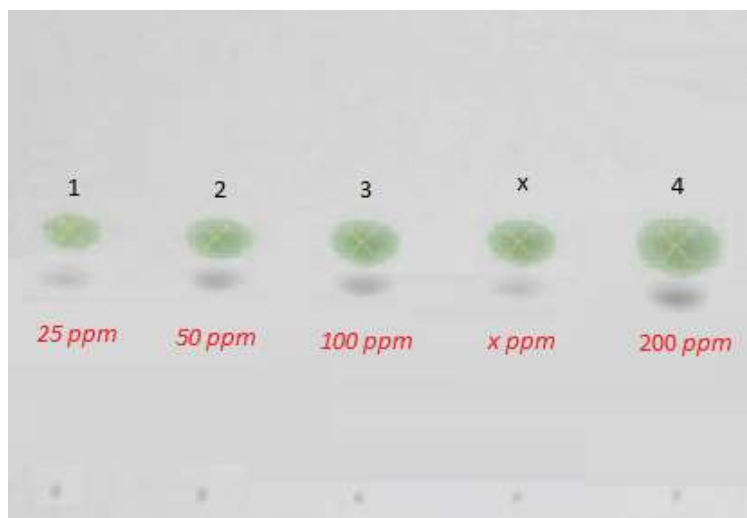


Рисунок 5 – Количественное определение картамина в образце 18 денситометрическим методом

Заключение

Экстракция картамина из первых семи образцов (лепестки сафлора желтого цвета) положительного результата не дала. Очевидно, такое сырье не может быть использовано для получения натурального красного красителя, что не исключает его использования для других целей. Органолептические показатели сырья действительно имеют значение, что упрощает работу по культивации и отбору этих растений [18, 19].

В остальных образцах картамин обнаружен был, и его доля от количества всех пигментов сафлора в объединенных водно-аммиачных экстрактах варьировалась от 40 % до 60 %.

В целом, можно заключить, что на сегодняшний день наблюдается недостаточное внимание к сафлору как к потенциальному источнику натуральных пищевых красителей [20, 21]. И если сокращение использования его пигментов в текстильной промышленности в прошлом веке в связи с открытием фуксина вполне объяснимо, то такое невнимание к нему со стороны специалистов пищевой индустрии скорее непонятно, принимая во внимание неприхотливость данного растения, большой опыт его культивирования как масличной культуры, стойкость окраски картамина и относительную дешевизну выделенного красителя по сравнению, например, с импортируемым красителем из кашенили (Е 120).

Отдельно стоит отметить тот факт, что пигменты сафлора могут быть качественно и количественно определены существующими современными методами аналитического контроля, а это, в свою очередь, расширяет возможности специалистов, занимающихся качеством и безопасностью продовольственных товаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пацовский, А.П. Научно-методические основы аналитического контроля пищевых красителей в алкогольных напитках: дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 : защищена 26.11.02 : утв. 14.03.03 / Пацовский Александр Петрович. - СПб., 2002. - 207 с. Библиогр.: с. 135-144.
2. ТР ТС 029/2012. Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств // Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю): утв. комиссией ТС 25.05.2010 [с изм. на 10.11.2015]. М., 2011. 331 с.
3. Изучение возможностей использования пигментов высших растений для производства пищевых красителей / Паньковский Г.А. // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. 2001. - № 2. - С. 664.
4. Семенова А.А. О технологической практике применения пищевых добавок в мясной промышленности // Все о мясе. 2009. - № 1. - С. 17-24.
5. Батушева Х.Ю. Влияние нетрадиционных видов сырья на технологические показатели теста и качество хлеба / Х.Ю. Батушева, С.И. Лукина, Е.И. Пономарева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. - 2016. - Т. 352, № 4. - С. 21-24.
6. Королук Е.А. Красильные растения Алтая и сопредельных территорий / Е.А. Королук // Химия растительного сырья. 2003. - №1. - С. 101-135
7. Кулешов А.М. Сафлор - культура перспективных возможностей // Научно-агрономический журнал. 2012. - № 1 (90). - С. 38-39.
8. Шостаковский С.А. Род Сафлор - *Carthamnus* // Флора СССР. М.-Л., 1963. - Т. 28. - С. 581-587.
9. Смирнов Е.В. Ингредиенты без Е-индекса для окрашивания пищевой продукции // Молочная промышленность. 2018. - №1. - С. 28-33.
10. Рудометова Н.В., Вахрушева Т.Е., Пацовский А.П. Сафлор - перспективный источник натуральных пищевых красителей // Тез. докл. четвертого Международного симпозиума «Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования», Пушино, 20-24 июня 2001. - Пушино, 2001. - Т. 3. - С. 600.
11. Кильянова Т.В. Сафлор красильный - культурой будущего / Кильянова Т.В., Сафина Н.В. // Агромир Поволжья. 2016. - № 4 (24). - С. 38-41.
12. Сокурова Д.А., Запорожец Г.С., Сметанкина В.С., Дьяконов В.А., Буховец В.А. Оценка цвета хлебобулочных изделий с добавлением измельченного сафлора с использованием колориметра // Сурский вестник. 2020. - №3 (11). - С. 65-70.
13. ГОСТ 12096-76 Сафлор для переработки. Технические условия. - М.: Издательство Стандартиформ, 1977. - 14 с.
14. Патент 1758049 РФ Способ получения концентрата желтого красителя из цветков сафлора / И.В. Копмане, А.А. Кулиев, Г.М. Насирова; заявитель и патентооб-ль Научно-производственное объединение «Биолар» и Кооператив «Чичек» по производству растительных экстрактов. - заявл. 23. 03.1990; опубл.

30.08.1992 - 3 с.

15. Сафлор - перспективный источник натуральных красящих веществ. Лебедева Н.В. // Науч. вклад молодых ученых в развитие пищевой и перераб. пром-сти АПК : сб. науч. тр. VII конф. молодых ученых и специалистов науч.-исслед. ин-тов Отд-ния хранения и переработки с.-х. продукции Россельхозакадемии, 8-9 октября 2013 г.-Москва, 2013.-С. 231-233.

16. Wang Hui-qin Определение картамина в Safflower (*Carthamus tinctorius* L) высокоэффективной жидкостной хроматографией с обращенными фазами / Wang Hui-qin, Xie Ming-yong, Fu Bo-qiang, Wang Xiao-ru // Fenxi ceshi xuebao = J. Instrum. Anal. - 2004. - 23, № 6. - С. 98-100.

17. Пацовский А.П. Современные достижения в области тонкослойной хроматографии // Мир измерений. - 2013. - № 1. - С. 36-40.

18. Камышева И.М. Сафлор красильный - перспективная культура многоцелевого использования / Камышева И.М., Крылова И.В. // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. 2018. № 13. С. 613-618.

19. Кароматов И.Д. Перспективное лекарственное растение - сафлор красильный (обзор литературы) / Кароматов И.Д., Акрамова Н.Ш. // Биология и интегративная медицина. 2018. - № 6 (23). - С. 68-95.

20. Adamen, F.F. Agricultural practices of growing safflower variety sunny under non irrigated conditions of the southern Ukraine/ F.F. Adamen, V.G. Naidenov, O.L. Rudik, I.O. Proshina //Науковотехнічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. - 2013. - Т. 18. - № 18. - С. 44-50.

21. Rudometova N.V. Method of Isolation and Identification of Carthamin in Saf-flower. Applications Perspectives in Russian Food Products / N.V. Rudometova, A.P. Pasovskij, E.A. Blohina // V International Safflower Conference, 23-27 July 2001.- Williston, N.D., U.S.A., 2001.- P.309-313.

Пацовский Александр Петрович

АО «ГосНИИхиманалит», СПб

ведущий научный сотрудник, к.т.н., доцент

197341, Санкт-Петербург, Парашютная ул., 12, кв. 7

8-911-909-58-07

E-mail: patsovskiy_ap@mail.ru

PATSOVSKIY A.P.

**USING CHROMATOGRAPHIC TECHNOLOGIES
AND SPECTROPHOTOMETRY TO STUDY COLORING PIGMENTS
OF SAFFLOWERS**

Annotation. *To date, the use of safflower coloring agents in Russia is still not widely developed, despite the unpretentiousness of the cultivation of this plant and the long-known healing properties. Yellow pigment is a mixture of two substances: hydroxysafflor and safflower yellow. The pigments are highly soluble in water, practically insoluble in alcohol and ether. The red substance (carthamine) is hardly soluble in water, but it is easily soluble in alcohol and alkalis. The effectiveness is shown and the use of photometric and chromatographic methods is recommended for the separation, identification and quantitative determination of the content of natural coloring pigments in extracts from safflower flowers – yellow pigments and carmine.*

Keywords: *safflower, control methods, chromatographic and spectral analysis, carthamin, natural dyes, pigment*

BIBLIOGRAPHY

1. Patsovskiy A.P. Scientific and methodological foundations of analytical control of food dyes in alcoholic beverages: dis.... Candidate of Technical Sciences : 05.11.13 : protected on 26.11.02 : approved on 14.03.03 / Patsovskiy Alexander Petrovich. - St. Petersburg, 2002. - 207 p. Bibliogr.: pp. 135-144.

2. TR CU 029/2012. Safety requirements for food additives, aromatizers and technological aids // Unified sanitary, epidemiological and hygienic requirements for products (goods) subject to sanitary and epidemiological supervision (control): approved by the CU Commission on 05/25/2010 [as amended on 11/10/2015]. m., 2011. 331 p.

3. Pankovskiy G.A. Studying the possibilities of using pigments of higher plants for the production of food dyes // Food and processing industry. Abstract journal. 2001. - No. 2. - p. 664.

4. Semenova A.A. On the technological practice of using food additives in the meat industry // All about meat. 2009. No. 1. pp. 17-24.

5. Batusheva H.Y. The influence of non-traditional types of raw materials on the technological parameters of dough and the quality of bread / H.Y. Batusheva, S.I. Lukin, E.I. Ponomareva [et al.] // Izvestia higher educational institutions. Digital technology. 2016. Vol. 352, No. 4. pp. 21-24.

6. Korolyuk E.A. Dyeing plants of Altai and adjacent territories // Chemistry of vegetable raw materials. 2003. - No. 1. - pp. 101-135.
7. Kuleshov A.M. Safflower is a culture of promising opportunities // Scientific and agronomic Journal. 2012. - № 1 (90). - Pp. 38-39.
8. Shostakovskiy S.A. The genus Safflower - *Carthamnus* // Flora of the USSR. Moscow, 1963, vol. 28, pp. 581-587.
9. Smirnov E.V. Ingredients without an E-index for coloring food products // Dairy industry. 2018. - No. 1. - pp. 28-33.
10. Rudometova N.V. Safflower is a promising source of natural food dyes / Rudometova N.V., Vakhrusheva T.E., Patsovskiy A.P. // Tez. dokl. The Fourth International Symposium «New and innovative plants and prospects for their use», Pushchino, June 20-24, 2001. - Pushchino, 2001. - Vol. 3. - P. 600.
11. Kilyanova T.V. Safflower is the culture of the future / Kilyanova T.V., Safina N.V.. // The agroworld of the Volga region. 2016. - № 4 (24). - Pp. 38-41.
12. Sokurova D.A. Evaluation of the color of bakery products with the addition of crushed safflower using a colorimeter / Sokurova D.A., Zaporozhets G.S., Smetankina V.S., Dyakonov V.A., Bukhovets V.A. // Sursky Bulletin. 2020. - №3 (11). - Pp. 65-70.
13. GOST 12096-76 Safflower for processing. Technical specifications. - M.: Publishing house Standartinform, 1977. - 14 p.
14. Patent 1758049 RF Method of obtaining yellow dye concentrate from safflower flowers / I.V. Kopmane, A.A. Kuliev, G.M. Nasirova; applicant and patent holder Scientific and Production Association «Biolar» and Cooperative «Chicek» for the production of plant extracts. - application 23. 03.1990; published. 30.08.1992 - 3 p.
15. Lebedeva N.V. Safflower is a promising source of natural coloring substances. // Scientific contribution of young scientists to the development of the food and processing industry. Agroindustrial complex : collection of scientific papers of the VII Conference of young scientists and specialists of scientific research. Institute for the Storage and Processing of agricultural products of the Russian Agricultural Academy, October 8-9, 2013. Moscow, 2013. pp. 231-233.
16. Wang Hui-qin, Xie Ming-yong, Fu Bo-qiang, Wang Xiao-ru, Determination of Carthamine in Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) by Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography // Fenxi ceshi xuebao = J. Instrum. Anal. - 2004. - 23, No. 6. - P. 98-100.
17. Patsovskiy A.P. Modern achievements in the field of thin-layer chromatography // The World of measurements, 2013, No. 1, pp. 36-40.
18. Kamysheva I.M. Safflower is a promising crop for multipurpose use / Kamysheva I.M., Krylova I.V. // New and non-traditional plants and prospects for their use. 2018. No. 13. pp. 613-618.
19. Karomatov I.D. Promising medicinal plant - safflower dye (literature review) / Karomatov I.D., Akramova N.S. // Biology and integrative medicine. 2018. - № 6 (23). - Pp. 68-95.
20. Adamen F.F. Agricultural practices of growing safflower variety sunny under non irrigated conditions of the southern Ukraine/ F.F. Adamen, V.G. Naidenov, O.L. Rudik, I.O. Proshina // Науковотехнічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. - 2013. - Т. 18. - № 18. - С. 44-50.
21. Rudometova N.V. Method of Isolation and Identification of Carthamin in Safflower. Applications Perspectives in Russian Food Products / N.V. Rudometova, A.P. Patsovskiy, E.A. Blohina // V International Safflower Conference, 23-27 July 2001.- Williston, N.D., U.S.A., 2001.- P.309-313.

Patsovskiy Alexander Petrovich

JSC «GosNIIkhimanalit», SPb

Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

197341, St. Petersburg, Parashyutnaya st., 12, sq. 7

8-911-909-58-07

E-mail: patsovskiy_ap@mail.ru

© Пацовский А.П., 2026

ЩЕРБАНЬ П.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Полимерные армированные материалы находят все более широкое применение в оборудовании различного назначения благодаря сочетанию малой массы, высокой коррозионной стойкости и достаточных прочностных характеристик. Вместе с тем эксплуатационные свойства и надежность изделий из таких материалов в значительной степени определяются их чувствительностью к внешним физическим воздействиям, способным вызывать деградацию структуры полимерной матрицы и межфазных связей. В настоящей работе выполнено исследование основных физических процессов, влияющих на качество и надежность полимерных армированных материалов и изготовленного из них оборудования. Рассмотрены разновидности полимерных армированных систем, а также механизмы воздействия температуры, влаги и излучения на их физико-химическое состояние и эксплуатационные характеристики. Показано, что указанные факторы могут приводить к изменению упруго-прочностных свойств, росту дефектности материала и ускоренному старению, что непосредственно отражается на долговечности и функциональной пригодности оборудования. В рамках исследования предложен обобщающий методический подход, позволяющий систематизировать влияние физических факторов внешней среды на состояние полимерных армированных материалов и оценивать их вклад в снижение качества изделий на различных этапах жизненного цикла. Полученные результаты формируют научную основу для разработки комплексного аппарата оценки надежности оборудования из полимерных армированных материалов. Настоящая работа является первой частью исследования, направленного на создание единой модели изменения качества оборудования из полимерных армированных материалов, учитывающей совокупное воздействие физических и механических факторов.

Ключевые слова: полимерные армированные материалы, надежность оборудования, управление качеством, температурные воздействия, влагопоглощение, воздействие излучения.

Введение

Полимерные армированные материалы находят широкое применение в нефтегазовой, коммунальной, транспортной, строительной и агрохозяйственной сферах. Фактически они представляют собой различные типы связующих композитных матриц и армирующих элементов. Надежность армированных полимеров неразрывно связана с химической природой как матрицы, так и армирующего материала, а также с межфазными взаимодействиями между ними [1].

Полимерные матрицы можно в целом разделить на термореактивные и термопластичные. Термореактивные полимеры, такие как эпоксидные, полиэфирные и винилэфирные смолы, характеризуются сшитой трехмерной сетчатой структурой, образующейся в результате необратимых реакций отверждения. Подобная структура выделяется высокой химической и термической стабильностью, но более подвержена механическим воздействиям. К менее хрупким типам матриц относят различные термопластичные полимеры, включая такие как полипропилен, полиэфирэфиркетон и полиамид. Они состоят из линейных или разветвленных цепей, которые размягчаются при нагревании. Это свойство создает дополнительную упругость и позволяет лучше переносить механические нагрузки, с другой стороны, подобные вещества менее инертны химически. Отметим, что химическая полярность, кристалличность и термические свойства матрицы существенно влияют на эффективность передачи нагрузки и устойчивость к воздействию окружающей среды, что критически важно для надежности полимерных армированных материалов [2].

Армирующие элементы, используемые в полимерных композитах, могут быть представлены волокнами (стеклянными, углеродными, арамидными), дисперсными материалами (керамическими, оксидами металлов, наноглинами), либо различными металлическими элементами (стальные и алюминиевые проволоки, цепи). Каждый тип

армирования обладает различными механическими, термическими и химическими характеристиками. Стекловолокно, будучи экономичным и химически инертным, обладает хорошей прочностью на разрыв, но ограниченной жесткостью и долговечностью при циклических нагрузках. Углеродные волокна обеспечивают превосходную жесткость, низкую плотность и отличную усталостную прочность, однако они чувствительны к воздействию окружающей среды и зачастую более дороги. Арамидные волокна (например, кевлар) обладают исключительной прочностью, но разрушаются в условиях интенсивного УФ-излучения или повышенной влажности. Стальные, алюминиевые и иные металлические армирующие элементы легче подвергаются воздействию диффузирующих через матрицу газов или иных агрессивных элементов внешней среды, испытывают термическое старение при нагреве либо усталость металла при циклических нагрузках [2].

Важно отметить, что надёжность армированных полимеров зависит не только от индивидуальных свойств матрицы и армирования, но и от их совместимости, межфазной адгезии и реакции на условия эксплуатации, такие как температура, влажность, воздействие УФ-излучения и механическое напряжение [3]. Микроструктурные факторы, включая ориентацию волокон, объёмную долю и содержание пустот, ещё больше усложняют прогнозирование характеристик. Понимание этих химических и физических особенностей необходимо для оптимизации конструкции композитных материалов и обеспечения их долгосрочной функциональности в различных областях применения. В связи со сложными и полифакторными механизмами разрушения этих материалов, выражающихся в различных видах дефектов (растрескивании матрицы, разрыве волокон, нарушении связи на границе раздела, расслоении) оценка надёжности обычно объединяет механический анализ со статистическими и вероятностными подходами [4].

В рамках настоящей работы исследуются особенности воздействия температуры, влажности и ультрафиолетового излучения на надёжность оборудования из полимерных армированных материалов. Одновременно формируется формульный и аналитический аппарат, предназначенный для последующего описания и анализа динамики изменения качества такого оборудования в процессе эксплуатации, деградация которого также обусловлена механическими и химическими воздействиями. Полученные результаты создают основу для прогнозирования изменения качества оборудования во времени с учётом параметров окружающей среды, свойств полимерного армированного материала и эксплуатационных характеристик.

Виды полимерных армированных материалов. Особенности сочетания матриц и армирующих компонентов.

Говоря о конструктивных особенностях оборудования из полимерных армированных материалов прежде всего отметим их главные преимущества - высокое соотношение прочности к массе, устойчивость к воздействию окружающей среды и возможность формования компонентов сложной формы со встроенными металлическими или не металлическими элементами. Однако подобные сильные стороны сопряжены с такими недостатками, как повышенная сложность производства и ограниченная перерабатываемость из-за сочетания разнородных материалов. В промышленности возможны различные комбинации наполняемой матрицы и армирующих компонентов.

Так среди полимерных матриц термореактивные обладают высокой тугоплавкостью, и подходят для тех материалов, основное предназначение которых выдерживать значительные температурные воздействия. В отличие от термореактивных матриц, термопластические проще изменяют свою конфигурацию под воздействием температуры, имеют значительно меньшую тугоплавкость, значительно более мягки и гибки. Они как правило не обладают той прочностью, как термореактивные. Третьим типом полимерных матриц являются эластомеры. Эластомеры – наиболее гибкие и растягивающие типы матриц.

Характер получаемых материалов, их физико-химические свойства, также определяются и видом армирования. Наиболее часто, для полимерных матриц используются четыре типа армирующих: металл, арамид, углерод, стекло. Во взаимодействии с различными

матрицами армирующие компоненты позволяют создать материалы с уникальными свойствами [5].

Важно отметить, что наряду с типами используемых компонентов, значимую роль в физико-химических свойствах полимерных армированных материалов играют и особенности сочетания полимерных матриц и армировки [6]. Наиболее распространенными являются шесть сочетаний (Рисунок 1). В случае если армирующие элементы, располагаются в матрице в виде небольших частиц (зерен) повышается твердость и износостойкость материала. При этом его прочность на растяжение и изгиб возрастает ограниченно. В целом, это связано с тем, что армирующие зерна расположены хаотично, а передача нагрузок – малоэффективна. Подобный тип армирования, с точки зрения механической прочности является самым слабым (некоторые авторы даже не считают подобный тип насыщения матрицы армирующими компонентами – собственно армированием). В ряде исследований установлено, что разрушение полимерных материалов, имеющих армирование зернами, начинается на границе раздела между матрицей и армирующими компонентами [7]. Особенно быстро оно идет при низкой адгезии и при возникновении концентрации напряжений между зернами. Такие концентраторы ведут к зарождению и быстрому распространению трещин.

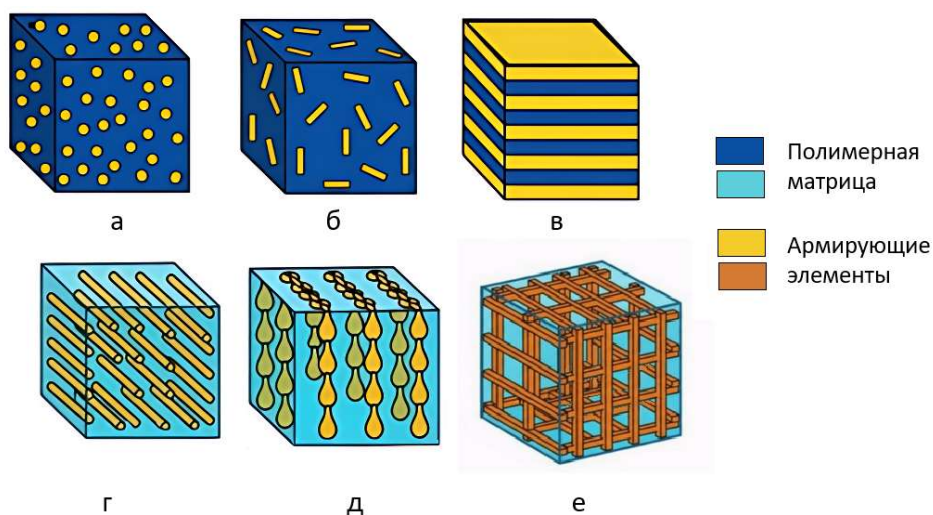


Рисунок 1 – Особенности сочетания полимерной матрицы и армирования:

а – Армирование зернами; б – Армирование гранулами, в - Армирование полосами (слоями), г – Армирование нитями (струнами); д – Армирование цепочками, е – Армирование с созданием структур (сотовой, кубической).

Использование в качестве армирующих элементов гранул позволяет повысить прочность и жесткость полимера, однако подобное армирование (как и армирование зернами) остается несвязным, что во многом предопределяет ограниченную способность выдерживать механические воздействия. Так, на краях гранул могут при нагрузках также возникать концентраторы напряжений и разрушение полимерного армированного соединения происходит аналогично тому же принципу, что и с зернистым армированием (только при больших нагрузках). Более продвинутым видом армирования, является ленточная или слоистая структура. В данном случае полимерная матрица разделяется прослойками армирующих материалов, часто ориентированных в определенном направлении. Подобная структура создает значительно большую прочность, вдоль направления армировки. Слоистые композиты, как правило, гораздо прочнее и жестче композитов с дисперсной структурой. Однако их прочность зависит от ориентации полос относительно приложенной нагрузки, при этом ослабление проявляется в направлениях, перпендикулярных армированию.

В случае использования армирующих нитей или цепей, формируется еще более прочная полимерная армированная структура [8]. В ней нагрузки гораздо более эффективно передаются от матрицы к волокнам, которые и несут большую часть напряжения. Цепное армирование прочнее чем нитевидное, поскольку придает матрице большую устойчивость к воздействиям, благодаря эффективному распределению нагрузки и большей адгезии,

формированию дополнительной связности между матрицей и армирующим компонентом. Безусловно самыми прочными являются структурированные армирующие элементы, имеющие виды сот, либо кубов, связанные друг с другом в нескольких направлениях и погруженные в полимерную матрицу [9]. Подобные структуры армирования разработаны для получения максимального соотношения жесткости к массе и улучшения поглощения энергии. Рассмотрев особенности структуры полимерных матриц, армирующих компонентов и их взаимосвязь, перейдем к анализу физических и химических воздействий на подобные материалы, а также к вопросу обеспечения их надежности и качества.

Воздействие физических процессов (температуры, увлажнения и ультрафиолетового излучения) на надежность полимерных армированных материалов.

Исследуем различные физические факторы, воздействие которых ведет к деградации связей между полимерной матрицей и армирующими элементами. Среди них стоит выделить температуру, влагопоглощение, ультрафиолетовое излучение, механические нагрузки и динамические воздействия. Каждый такой фактор по-своему изменяет прочностные свойства армированных полимеров. Еще более сложна оценка их синергетического эффекта [10].

Влияние температуры на полимерные армированные материалы заключается в нарушении когезионных сил, действующих между однородными частицами материалов и адгезионных сил связующих матрицу и армирование. Рассмотрим упрощенную формульную основу, описывающую изменение когезионных сил внутри матрицы. Она может быть выражена с применением уравнений из теории термореактивного разрушения Сванте Арениуса:

$$\frac{dN_c}{dt} = -\eta_c(T)N_c \quad (1)$$

где N_c – число когезионных связей, T – температура, а η_c – скорость термоактивируемого разрушения связей матрицы. Она в свою очередь определяется по формуле:

$$\eta_c(T) = k_{c0}e^{-E_c/RT} \quad (2)$$

где E_c – энергия активации разрушения когезионных связей (Дж/моль), R – универсальная газовая постоянная; k_{c0} – частотный фактор (аналог частоты столкновений в химической кинетике), он характеризует «максимально возможную» скорость разрушения когезионных связей при отсутствии энергетического барьера.

Изменение прочностных характеристик матрицы происходит нелинейно в разных направлениях из-за анизотропной природы материала, кроме того, в процессе нагрева происходит термодегградация прочностных связей что также приводит к отклонениям. Например, для полимерных армированных систем полиэтилен-сталь, полипропилен-алюминий, полиэтилен-арамид, полипропилен-углерод, наблюдается следующая динамика изменения когезионной прочности матрицы (Рисунок 2а). Здесь и далее оговоримся, что в графических материалах будем представлять тип армирования нитями, поскольку он по своим характеристикам занимает некое промежуточное значение между гранулами и зёрнами и армированием структурами. Безусловно показатели

Изменение адгезионных сил, действующих между матрицей и полимером, также упрощенно, может быть выражено, через термодинамическую зависимость, посредством уравнения Дюпре–Юнга:

$$W_a = y_m + y_f - y_{mf} \quad (3)$$

где W_a – работа адгезии, y_m – поверхностная энергия матрицы, y_f – поверхностная энергия армирующего материала, y_{mf} – энергия межфазного взаимодействия.

Или работу адгезионных сил можно представить в экспоненциальной форме:

$$W_a(T) = W_{a0} \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right) \quad (4)$$

где E_c – энергия активации разрыва межфазных связей, W_{a0} – уровень адгезионной энергии системы.

Следует учесть, также и то, что прочность на сдвиг границы матрица – армирующий элемент убывает с ростом температуры аналогично экспоненциальной зависимости:

$$\eta_a(T) = \frac{W_a(T)}{r_c} \quad (5)$$

где: η_a – скорость деградации связи матрицы и армирования, r_c – характерный радиус зоны контакта или критическая длина сдвига, между матрицей и армирующими элементами.

Силы адгезии между частями матрицы и армирования для тех же систем, аналогично падают, при возрастании температуры (Рисунок 2б). При этом в процессе нагрева скорости падения прочностных свойств системы полимерных армированных соединений неравномерны по объему, направлению и разнятся на границе сред, внутри армирующих компонентов и внутри матриц [11]. На границах сред возникают дополнительные напряжения в связи с расширением армирующего компонента под нагревом.

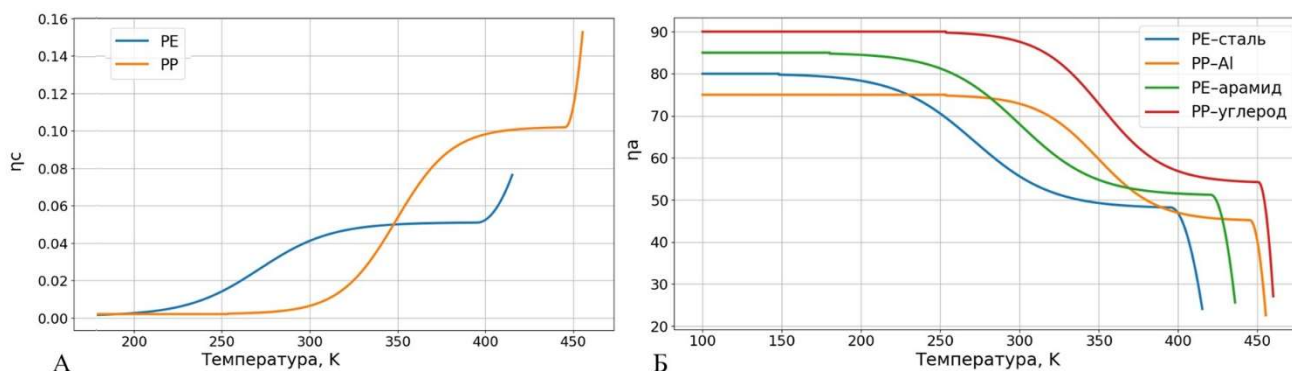


Рисунок 2 - Деградация полимерных армированных материалов под действием температуры.

А - скорость термоактивируемого разрушения связей матрицы; Б - скорость деградации связи матрицы и армирования

Таким образом, можно сформировать обобщенный коэффициент деградации полимерного армированного материала от температуры:

$$\eta(T) = \eta_c(T) * \eta_a(T) \quad (6)$$

Важным фактором, оказывающим влияние на прочностные свойства и надежность системы полимерного армированного материала, является водопоглощение. Действительно, молекулы воды, попадая на поверхность матрицы начинают диффундировать в нее. Они размещаются в межмолекулярном пространстве до определенной глубины, снижая прочностные свойства и утяжеляя материал. Подобными гигроскопичными матрицами могут быть полиамиды, некоторые эластомеры и арамиды [12]. Молекулы воды проникают в полимерную матрицу, вызывая пластификацию, снижение модуля упругости, набухание и возможную гидролитическую деградацию. Для описания изменения прочности полимерного армированного материала при смачивании, когда поглощение воды регулируется диффузией на границе раздела, можно объединить микромеханические модели прочности композита с уравнением Уорда–Тордаи, которое основано на теории межфазной диффузии.

$$G(t) = 2C_b \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} - 2D \int_0^t \frac{C_s(\tau)}{\sqrt{\pi D(t-\tau)}} d\tau \quad (7)$$

где $G(t)$ - количество адсорбированных молекул воды на единицу площади в момент времени t , C_b - концентрация воды в объеме, $C_s(\tau)$ - концентрация воды на поверхности в момент τ , D - коэффициент диффузии воды в полимерной матрице.

Локальное распределение концентрации воды в матрице можно описать как:

$$C(x, t) = C_s(t) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (8)$$

где x – расстояние до поверхности, $C_s(t)$ концентрация воды на поверхности в момент t , t – время от начала контакта с водой, erfc - дополнительная функция ошибок, описывает форму концентрационного профиля, возникающего при решении уравнения Фика.

Со временем область повышенного содержания влаги расширяется, а концентрация в поверхностных слоях достигает равновесия.

Прочность композита при равновесном (насыщенном) состоянии после смачивания водой можно определить по формуле:

$$\sigma_{c,\infty} = V_f \sigma_f \eta_{00} (1 - \beta G_{\infty}) + V_m \sigma_{m0} (1 - \alpha \overline{C_{\infty}}) \quad (9)$$

где $\sigma_{c,\infty}$ - предел прочности композита после того, как процесс диффузии и адсорбции воды завершился, и установилось стационарное распределение влаги, V_f – объемная доля армирующих элементов, V_m – объемная доля матрицы, σ_f – прочность армирующих элементов, σ_{m0} – прочность матрицы до смачивания, η_{00} – коэффициент эффективности сцепления волокна с матрицей в сухом состоянии, отражающий качество передачи нагрузки с матрицы на волокна.

В данном уравнении $(1 - \beta G_{\infty})$ – описывает ослабление межфазного сцепления из-за сорбции воды на поверхности волокон, если $\beta G_{\infty} \ll 1$, то влияние воды невелико и прочность остается близкой к исходной, если $\beta G_{\infty} \approx 0,3 - 0,5$, связь ослабевает значительно, прочность падает. Физически это связано с тем, что молекулы воды проникают между полярными группами на поверхности волокна и в матрице, разрывая водородные связи и снижая энергию адгезии. Член $(1 - \alpha \overline{C_{\infty}})$, описывает пластификацию и снижение прочности полимерной матрицы под действием влаги. Проиллюстрируем изменение прочности от водонасыщения (Рисунок 3).

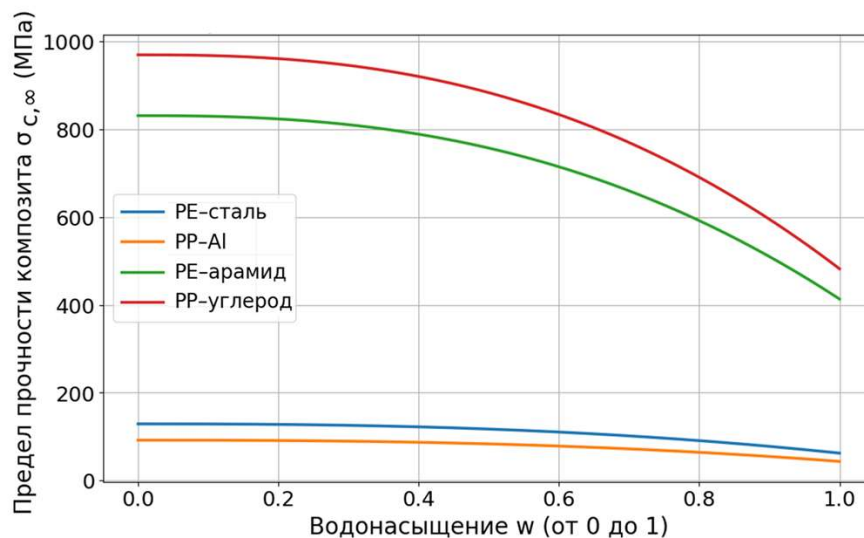


Рисунок 3 - Изменение прочности различных полимерных армированных материалов вследствие водопоглощения

Тогда упрощенно коэффициент деградации полимерного армированного материала от влажности можно выразить через формулу:

$$\eta(H) = \frac{\sigma_{c,\infty}}{\sigma_{c,(0)}} = \frac{V_f \sigma_f \eta_{00} (1 - \beta G_{\infty}) + V_m \sigma_{m0} (1 - \alpha \overline{C_{\infty}})}{V_f \sigma_f \eta_{00} + V_m \sigma_{m0}} \quad (10)$$

где $\sigma_{c,(0)}$ – предел прочности полимерного армированного материала в сухом состоянии, до воздействия влаги.

Частым физическим воздействием, приводящим к падению прочностных свойств полимерных армированных материалов, является ультрафиолетовое (УФ) излучение. Оно вызывает комплекс химических и структурных процессов, ведущих к деградации матрицы, ослаблению межфазного сцепления и, как следствие, снижению прочностных характеристик композита [13]. Проиллюстрируем динамику потери прочности полимерных армированных соединений в связи с воздействием ультрафиолетового излучения (Рисунок 4.). Основным механизм связан с фотодеструкцией полимера – разрывом химических связей под действием квантов излучения с энергией $h\nu$, превышающей энергию связи E_b в полимерной цепи. Если $E_b \leq h\nu$, то происходит фотолиз, инициирующий образование свободных радикалов. Возникшие радикалы вступают в реакции окисления и рекомбинации, изменяя молекулярную

массу и структуру полимера. Изменение прочности матрицы при облучении можно описать как экспоненциальное убывание прочности во времени или с дозой облучения.

$$\eta_m(R) = \sigma_{m0} \exp(-k_m H) \quad (11)$$

где: $\eta_m(R)$ - прочность, после воздействия дозы (которая определяется, как $H = It$, где I – интенсивность излучения, а t - время), k_m – коэффициент фотодеструкции матрицы, зависящий от поглощательной способности и химической структуры полимера, σ_{m0} – прочность матрицы, до воздействия облучения.

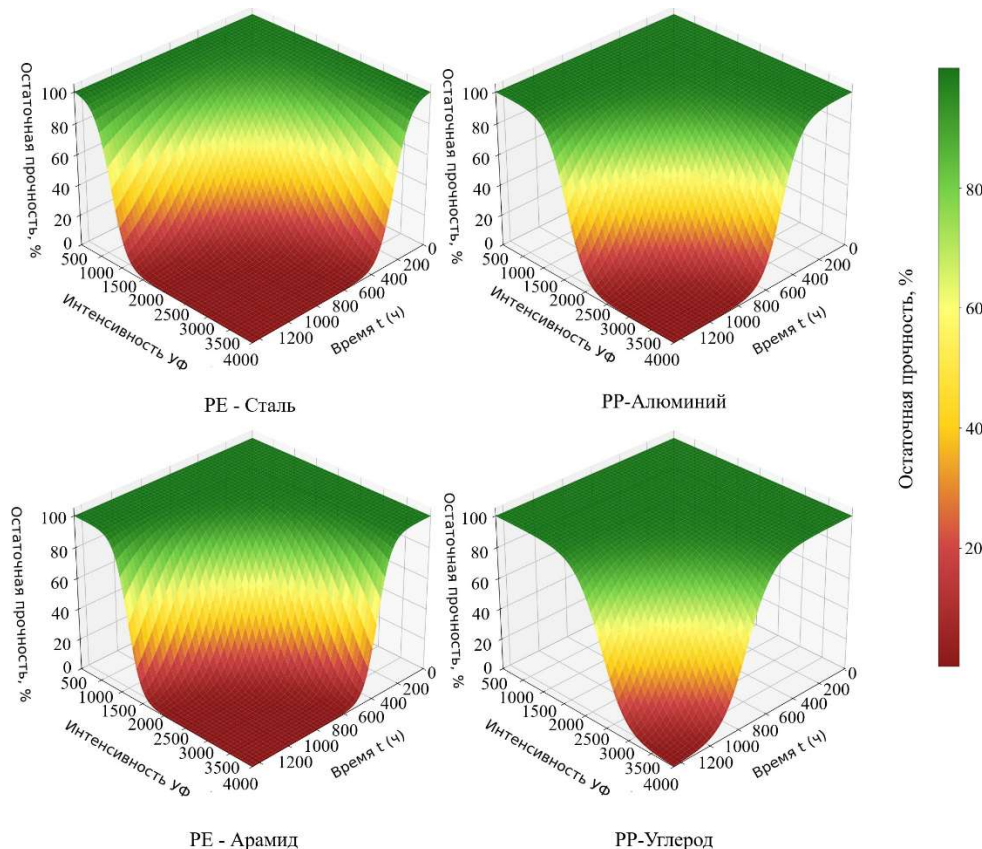


Рисунок 4 - Изменение прочности различных полимерных армированных материалов вследствие ультрафиолетового излучения

Армирующие компоненты, часто более устойчивы к УФ-излучению, однако на границе раздела происходит ослабление адгезии. УФ-свет разрушает связи между функциональными группами на поверхности (особенно в стеклянных и органических волокнах), а также фотостарит связующий слой (силановые или эпоксидные агенты) [14]. Падение прочностных свойств связующего слоя (разрушение адгезионных связей с матрицей), также зависит от дозы облучения:

$$\eta_a(R) = \sigma_{a0} \exp(-k_i H) \quad (12)$$

где $\eta_a(R)$ – прочность адгезионных связей на границе матрицы и армирования, после воздействия дозы облучения, k_i - коэффициент деградации межфазного сцепления, σ_{a0} – прочность адгезионных связей до воздействия облучения, H - накопленная доза УФ-излучения.

Тогда упрощенно коэффициент деградации полимерного армированного материала от УФ излучения можно выразить как:

$$\eta(R) = \eta_m(R) \eta_a(R) = \exp(-(k_m + k_i) It) \quad (13)$$

Важно также отметить, фотохимические процессы ведут к возникновению на поверхности матрицы микротрещин, что увеличивает диффузию кислорода и воды внутрь материала, а это в свою очередь ведет к фотоокислительной деградации, накоплению микродефектов, расслаиванию и выкрашиванию. Излучение в целом ведет к

экспоненциальному снижению прочностных характеристик, ослаблению когезионных свойств материала матрицы, а также ослаблению адгезии матрицы к армирующим компонентам. Подобные процессы безусловно влияют на качество оборудования, использующего полимерные армированные материалы. Рассмотрим взаимосвязь приведенных показателей деградации, надежности материалов и качества изготовленного из них оборудования.

Изменение качества оборудования (использующего полимерные армированные материалы) под воздействием физических процессов

Для иллюстрации изменения качества используем оборудование, применяющее сочетания полиэтиленовой матрицы и стального армирования (полимерные армированные трубы со стальным каркасом), а также применяющее сочетания полипропиленовой матрицы и алюминиевого армирования (теплообменники), полиэтиленовой матрицы с арамидным армированием (емкости и баллоны) и полипропиленовой матрицы с углеродным армированием (насосы и компрессоры).

Так трубы с полиэтиленовой матрицей и стальным армированием широко применяются в составе систем для транспортировки жидких и газообразных сред под давлением. Конструктивно данные трубы представляют собой композиционные элементы, в которых полиэтиленовая матрица обеспечивает герметичность и коррозионную стойкость, а стальное армирование в виде спирали или сетки воспринимает основные нагрузки от внутреннего давления и повышает жесткость трубопровода (рисунок 5 а₁). Надежность таких труб как элементов трубопроводного оборудования формируется под воздействием совокупности внешних и внутренних физических факторов и закономерно изменяется во времени. Определяющее влияние оказывает температурное воздействие. Повышение температуры транспортируемой среды приводит к снижению модуля упругости полиэтилена, интенсификации ползучести и уменьшению долговременной прочности труб [6]. Существенное различие коэффициентов теплового расширения полиэтилена и стали вызывает возникновение термически индуцированных напряжений на границе матрица–армирование, что при циклических тепловых режимах способствует накоплению микродефектов и ослаблению межфазного взаимодействия. При пониженных температурах возрастает вероятность хрупкого разрушения полиэтиленовой матрицы в зонах концентрации напряжений.

Воздействие влаги и смачивание труб в процессе эксплуатации, характерные для подземных и надземных трубопроводов, ускоряют процессы физического старения полиэтилена и в сочетании с температурными колебаниями и внутренним давлением приводят к снижению механической стабильности труб. Ультрафиолетовое излучение, действующее при открытой прокладке, инициирует фотохимическую деградацию полиэтилена, сопровождающуюся разрушением макромолекулярной структуры и ухудшением прочностных и деформационных характеристик материала. Во времени надежность труб снижается вследствие накопления необратимых изменений в структуре полимерно-металлической системы, что проявляется в уменьшении несущей способности, росте вероятности трещинообразования и потере герметичности. Для трубопроводов как линейных объектов локальное снижение надежности отдельной трубы критически влияет на работоспособность всей системы и может приводить к отказу трубопровода в целом [15].

При этом надежность является не единственным, но одним из ключевых показателей качества трубопроводного оборудования. Изменения, происходящие в материале под воздействием температуры, влаги и излучения, одновременно отражаются на других качественных характеристиках - долговечности, эксплуатационной безопасности, устойчивости к циклическим нагрузкам, ремонтпригодности и стабильности гидравлических параметров. Наиболее ярко в части внешнего проявления физических воздействий на полимерные армированные трубы проявляется влияние температуры (Рисунок 5 а₂).



Рисунок 5. Результаты физических воздействий на оборудование из полимерных армированных материалов:

a₁ - полимерные армированные трубы со стальным каркасом (без теплового воздействия); a₂ - с тепловым воздействием; б₁ - теплообменники (полипропилен и алюминий) без воздействий; б₂ - с воздействием температуры и влажности; в₁ - баллон (полиэтилен и арамид), без воздействий; в₂ - после термомеханических, химических и фотохимических воздействий, г₁ - насос (полипропилен и углерод), без воздействий; г₂ - после термомеханических, химических и фотохимических воздействий.

Теплообменные аппараты малой и средней мощности, выполненные из сочетания полипропиленовой матрицы и алюминиевого армирования, широко применяются в химической, водоподготовительной, пищевой и климатической технике. Конструктивно такие аппараты (пластинчатые и трубчатые) используют полипропилен как коррозионностойкий и технологичный материал теплообменных поверхностей, тогда как алюминий обеспечивает требуемую теплопроводность и механическую стабильность (рисунок 5 б₁). Надежность данных теплообменных аппаратов изменяется под воздействием совокупности физических факторов и закономерно снижается во времени. Определяющим является также температурное воздействие. Повышение температуры рабочей среды приводит к снижению модуля упругости полипропилена, интенсификации ползучести и уменьшению несущей способности теплообменных элементов. Различие коэффициентов теплового расширения полипропилена и алюминия вызывает термически индуцированные напряжения на межфазной границе, которые при циклических режимах эксплуатации способствуют деградации адгезионного взаимодействия и накоплению микродефектов [8]. При пониженных температурах возрастает склонность полипропилена к хрупкому разрушению, что ограничивает допустимые режимы эксплуатации оборудования.

Смачивание и длительный контакт с жидкими рабочими средами ускоряют процессы физического старения полипропилена, особенно при сочетании с повышенными температурами. Это приводит к изменению структуры полимерной матрицы, снижению ее механической стабильности и ухудшению сопряжения с алюминиевыми элементами, что негативно отражается на герметичности и долговечности аппарата. Ультрафиолетовое излучение в части теплообменных аппаратов – более редкий фактор, поскольку в основном они находятся в закрытых помещениях. Если же теплообменные установки смонтированы на открытом воздухе, то ультрафиолетовое излучение инициирует фотохимическую деградацию полипропилена, также сопровождающуюся снижением прочностных и деформационных характеристик и ускоренным поверхностным старением.

Во времени надежность подобных теплообменников снижается вследствие накопления необратимых изменений в полимерно-металлической системе, проявляющихся в росте вероятности дефектов, снижении герметичности и устойчивости к тепломеханическим

нагрузкам. Надежность при этом является одним из ключевых, но не единственным показателем качества оборудования. Ее снижение сопровождается ухудшением теплообменной эффективности, эксплуатационной безопасности, устойчивости к циклическим нагрузкам и ремонтпригодности [12]. Специфика теплообменных аппаратов заключается в том, что деградация материала напрямую влияет и на функциональные характеристики оборудования, что требует комплексного учета физических воздействий при проектировании и оценке его ресурса (рисунок 5 б₂).

Ёмкости и баллоны для хранения сжиженных и сжатых сред, изготовленные из полиэтиленовой матрицы с арамидным армированием, представляют собой высокопрочные лёгкие конструкции, объединяющие коррозионную устойчивость, механическую стабильность и способность выдерживать значительные внутренние давления (рисунок 5 в₁). Такие изделия широко применяются в химической, энергетической и транспортной отраслях, где критичны долговечность, безопасность и эксплуатационная надежность. Надежность подобных сосудов определяется совокупностью свойств матрицы и армирования и их чувствительностью к эксплуатационным воздействиям. Изменение внутренней температуры рабочей среды приводит к изменениям термомеханического состояния конструкции: повышение температуры снижает модуль упругости полиэтилена, усиливает деформации под давлением и ускоряет ползучесть матрицы. Различие коэффициентов теплового расширения полиэтилена и арамидных волокон формирует термические напряжения на межфазной границе, способствующие накоплению микродефектов и ослаблению адгезии. При низких температурах полимер становится более хрупким, что снижает устойчивость к внутреннему давлению. Длительный контакт с рабочей средой и смачивание ускоряют процессы физической деградации матрицы, вызывая локальное набухание и образование микротрещин в зонах концентрации напряжений, что снижает надежность конструкции. В случае если баллон подвергается длительному облучению ультрафиолетом, то инициируется фотохимическая деструкция полиэтилена [12]. Это снижает ударную вязкость и прочностные характеристики матрицы. Арамидные волокна сохраняют механическую прочность, однако деградация матрицы уменьшает целостность конструкции и герметичность, что отражается на долговременной надежности аппарата.

Со временем накопление термомеханических, химических и фотохимических изменений закономерно снижает надежность - уменьшается несущая способность, увеличивается вероятность межфазных дефектов и теряется герметичность. Надежность является ключевым, но не единственным показателем качества: её снижение негативно влияет на долговечность, эксплуатационную безопасность, устойчивость к циклическим нагрузкам и ремонтпригодность оборудования. Специфика подобных сосудов заключается в комплексном воздействии физических факторов на матрицу и армирование, что требует интегрированного подхода при проектировании, эксплуатации и оценке состояния оборудования с учетом всех внешних воздействий (рисунок 5 в₂).

Детали насосов и компрессоров, эксплуатируемые при повышенных температурах, выполненные из полипропиленовой матрицы с углеродным армированием, представляют собой высокопрочные лёгкие элементы, способные выдерживать значительные механические и тепловые нагрузки (рисунок 5 г₁). Такая композитная структура обеспечивает сочетание высокой коррозионной устойчивости, термостойкости и повышенной прочности, что особенно важно для насосного и компрессорного оборудования в химической, нефтехимической и энергетической промышленности [10].

Надежность таких деталей в основном определяется устойчивостью полимерно-углеродной структуры к термомеханическим и химическим воздействиям. Изменение внутренней температуры рабочей среды приводит к изменению модуля упругости полипропилена: повышение температуры снижает жесткость матрицы, увеличивает деформации и ускоряет ползучесть, тогда как разница коэффициентов теплового расширения полипропилена и углеродного армирования вызывает локальные термические напряжения на межфазной границе, способствующие образованию микродефектов. При пониженных температурах матрица становится более хрупкой, что снижает устойчивость детали к механическим нагрузкам и циклическому нагружению. Воздействие рабочей среды и смачивание ускоряют физическую деградацию матрицы, вызывая локальное набухание и

образование микротрещин, что уменьшает долговечность и герметичность деталей. Ультрафиолетовое излучение, практически не играет роли в изменении надежности оборудования, поскольку оно как правило скрыто от прямых солнечных лучей. Под различными термомеханическими воздействиями углеродное армирование сохраняет механическую прочность, однако деградация матрицы снижает целостность конструкции и эксплуатационную надежность. Со временем накопление термомеханических и химических изменений закономерно снижает надежность, что отражается на долговечности оборудования, безопасности его применения, а также устойчивости к циклическим нагрузкам (Рисунок 5 г₂).

Изменение качества оборудования (использующего в своем составе полимерные армированные материалы) в процессе эксплуатации, может быть описано в формульном виде. Для этого необходимо учесть начальный уровень качества, а также деградационные изменения от внешних воздействий [15]. Кроме того, в ряде случаев возможно учесть и воздействие от технического обслуживания и ремонтных работ (например нанесение защитных покрытий, переизоляции), что продлит возможность использования оборудования. Для оборудования из полимерных армированных материалов качество во времени может быть представлено в виде экспоненциальной функции:

$$Q(t) = Q_0 \cdot \exp\left(-\int_0^t (k_{env}(t) + k_{op}(t)) dt\right) + \sum_{i=1}^{N(t)} \Delta Q_i \exp\left(\int_{t_i}^t (k_{env}(t) + k_{op}(t)) dt\right) \quad (14)$$

где Q_0 - начальное качество оборудования; t - время эксплуатации; $k_{env}(t)$ - деградация под действием факторов среды; $k_{op}(t)$ - деградация, связанная с режимом эксплуатации и техническим обслуживанием; t_i - момент проведения i -го ремонта или восстановительного обслуживания; ΔQ_i - приращение функции качества в результате ремонта; $N(t)$ - число ремонтных воздействий за период $[0, t]$.

При этом, неотъемлемыми элементами, формирующими $k_{env}(t)$, являются ранее рассмотренные $\eta(R)$ коэффициент деградации полимерного армированного материала от УФ излучения, $\eta(H)$ коэффициент деградации полимерного армированного материала от влажности и $\eta(T)$ коэффициент деградации полимерного армированного материала от температуры. Отметим также, что значимыми воздействиям, формирующими $k_{env}(t)$ являются механические и химические, рассмотрение специфики которых находится за рамками данной работы.

Значение приведенной функции качества изменяется в диапазоне от единицы, соответствующей номинальному состоянию оборудования на момент ввода в эксплуатацию, до нуля, соответствующего предельному состоянию, при котором дальнейшая эксплуатация без восстановительных мероприятий не допускается ($0 \leq Q \leq 1$ – диапазон изменения функции). Изменение функции качества во времени носит в общем случае убывающий характер и отражает накопление необратимых процессов деградации полимерной матрицы, армирующего наполнителя и межфазных связей. Основной вклад в снижение функции качества вносят термоокислительная деградация при повышенных температурах, влагопоглощение и гидролиз, а также фотодеструкция под действием ультрафиолетового излучения. Дополнительное влияние оказывают механические нагрузки, цикличность режимов эксплуатации и взаимодействие различных факторов, приводящее к ускорению деградационных процессов [15].

При постоянных условиях эксплуатации и отсутствии вмешательства (в виде ремонта и технического обслуживания) изменение функции качества может быть аппроксимировано экспоненциальной зависимостью, характеризующейся постоянной скоростью деградации. В этом случае траектория функции $Q(t)$ является гладкой и монотонно убывающей, а скорость снижения определяется суммарным коэффициентом деградации, учитывающим воздействие окружающей среды и эксплуатационных нагрузок. Для оборудования из полимерных армированных материалов такая зависимость адекватно описывает основной эксплуатационный период до наступления интенсивного старения.

Техническое обслуживание и ремонт изменяют характер изменения функции качества во времени. Проведение регламентных мероприятий, направленных на восстановление защитных покрытий, снижение воздействия ультрафиолетового излучения, устранение дефектов поверхности, восстановление герметичности соединений и снижение локальных

напряжений, приводит к уменьшению скорости деградации функции качества. В математическом описании это проявляется в снижении текущего коэффициента деградации и, как следствие, в изменении наклона траектории $Q(t)$ без увеличения её значения выше исходного уровня. Ремонтные воздействия, направленные на восстановление эксплуатационных свойств оборудования, допускают частичное повышение значения функции качества по сравнению с состоянием непосредственно перед ремонтом. При этом восстановление носит ограниченный характер и не приводит к полному возврату к начальному значению функции, так как часть деградационных процессов является необратимой. Временная траектория функции качества при наличии ремонтов представляет собой кусочно-гладкую кривую с участками замедленного снижения или локального повышения $Q(t)$, после чего деградация продолжается с новой, как правило, пониженной скоростью. В долгосрочной перспективе, несмотря на проведение технического обслуживания и ремонтов, функция качества будет стремиться к предельному значению.

Выводы

Выполненное исследование показало, что надежность и качество оборудования из полимерных армированных материалов определяются совокупным влиянием свойств полимерной матрицы, типа армирования и характера межфазных взаимодействий, а также их чувствительностью к условиям эксплуатации. Установлено, что различия в химической природе матриц и армирующих компонентов, а также в архитектуре армирования приводят к существенным отличиям в механизмах деградации и темпах снижения эксплуатационных характеристик. Это подтверждает невозможность использования универсальных эмпирических оценок надежности и необходимость учета структурно-физических особенностей конкретных полимерных армированных систем.

Показано, что температура, влажность и ультрафиолетовое излучение являются ключевыми физическими факторами, определяющими деградацию полимерной матрицы, армирующих элементов и межфазных связей. Термические воздействия инициируют термоокислительную деструкцию и ослабление когезионных и адгезионных связей, влагопоглощение приводит к пластикации, гидролизу и снижению прочности матрицы и сцепления с армированием, а ультрафиолетовое излучение вызывает фотодеструкцию и ускоренное поверхностное старение. Совокупное действие этих факторов носит нелинейный и, в ряде случаев, синергетический характер, что проявляется в ускоренном накоплении дефектов и снижении долговечности оборудования.

В рамках работы сформирован формульный и аналитический аппарат, позволяющий связать деградацию материалов с изменением интегральной функции качества оборудования во времени. Предложенная экспоненциальная модель адекватно описывает убывающий характер функции качества при постоянных условиях эксплуатации и позволяет учитывать влияние восстановительных мероприятий в виде изменения скорости деградации и ограниченного повышения уровня качества. Показано, что техническое обслуживание и ремонт способны существенно замедлять снижение качества, однако не устраняют необратимый характер деградационных процессов, вследствие чего в долгосрочной перспективе функция качества стремится к предельному состоянию.

Полученные результаты формируют методическую и физическую основу для прогнозирования изменения качества оборудования из полимерных армированных материалов с учетом параметров окружающей среды, свойств материалов и режимов эксплуатации. Вместе с тем для полноты картины и формирования полноценного формульного аппарата оценки изменения показателей качества в дальнейшей работе планируется детальное рассмотрение механических воздействий, включая статические, циклические и динамические нагрузки, а также их взаимодействие с физическими и химическими факторами деградации. Это позволит перейти к комплексной модели надежности оборудования из полимерных армированных материалов на протяжении всего жизненного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Румянцев, А. Н. Полимерные композиционные материалы и их применение на практике / А. Н. Румянцев, В. Н. Филиппов // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. – 2019. – № 14. – С. 116-121. – EDN JELXRD.
2. Анализ и рациональный выбор полимерных композиционных материалов для изделий по их физико-механическим свойствам / Д. В. Лобанов, С. А. Сидоренко, Д. А. Ющенко, А. В. Большешапова // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 206-212. – EDN TZDYSF.
3. Лотенкова, М. Д. Применение полимерных композиционных материалов в мостостроении / М. Д. Лотенкова // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2021. – Т. 2. – С. 306-310. – EDN XXTRFI.
4. Алферов, И. В. Анализ прочности и устойчивости композитных строительных материалов при динамических нагрузках / И. В. Алферов // Экономика строительства. – 2025. – № 2. – С. 421-423. – EDN LMJJFI.
5. Исследование влияния масштабного фактора на прочностные свойства полимерных композиционных материалов / В. В. Кирюшина, Ю. Ю. Ковалева, П. А. Степанов, П. В. Коваленко // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 97-106. – DOI 10.26583/npe.2019.1.09. – EDN INWHJT.
6. Коломиец, А. В. Влияние особенностей композиционных материалов на область их применения / А. В. Коломиец, А. С. Неверов // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2013. – № 2(27). – С. 91-93. – EDN QKBPUE.
7. Rajak, Dipen Kumar, et al. "Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications." *Polymers* 11.10 (2019): 1667.
8. Sharma, M., Sharma, R., & Sharma, S. C. (2021). A review on fibres and fillers on improving the mechanical behaviour of fibre reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6482-6489.
9. Benin, M. A., Retnam, B. S. J., Ramachandran, M., Sivapragash, M., & Dhas, J. E. R. (2015). Comparative study of tensile properties on Thermoplastic & Thermosetting polymer composites. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(11), 10109-10113.
10. Hsieh, T. H., Huang, Y. S., & Shen, M. Y. (2015). Mechanical properties and toughness of carbon aerogel/epoxy polymer composites. *Journal of Materials Science*, 50(8), 3258-3266.
11. Naufal, M. I., Wong, K. J., Israr, H. A., Nejad, A. F., Rahimian Koloor, S. S., Gan, K. W.,... & Siebert, G. (2024). Digital image correlation technique for failure and crack propagation of fibre-reinforced polymer composites—A review. *Composites and Advanced Materials*, 33, 26349833241253619.
12. Bakkiyaraj M. et al. Mechanical Behavior and Applications of Hybrid Polymer Composites Reinforced with Natural Fibers: A Narrative Theoretical Review // *Solid State Phenomena*. – 2025. – Т. 369. – С. 17-36.
13. Bochkarev S. V., Salnikov A. F., Galinovsky A. L. An Experimental Study on Residual Stresses and the Evaluation of Performance of Polymer Composite Materials // *Mechanics of Composite Materials*. – 2023. – Т. 59. – №. 5. – С. 977-988.
14. Xavier S. F. (ed.). Thermoplastic polymer composites: processing, properties, performance, applications and recyclability. – John Wiley & Sons, 2022.
15. Щербань П. С. Разработка систем показателей качества полимерных армированных труб и их соединений. Вопросы математической обработки данных // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2024. – Т. 26. – №. 2 (118). – С. 80-95.

Щербань Павел Сергеевич

АО «ВНИИСТ»,

к.т.н., доцент

Ведущий научный сотрудник

125319, г. Москва, 4 - я улица 8 Марта, д. 3, стр. 1

E-mail: p.Shcherban@vniist.ru

SHCHERBAN P.S.

RESEARCH OF PHYSICAL PROCESSES AFFECTING THE RELIABILITY AND QUALITY OF EQUIPMENT MADE OF POLYMER REINFORCED MATERIALS

Abstract: Polymer reinforced materials are finding increasingly widespread application in equipment for various purposes due to their combination of low weight, high corrosion resistance, and sufficient strength characteristics. At the same time, the operational properties and reliability of products made from such materials are largely determined by their sensitivity to external physical influences that can cause degradation of the polymer matrix structure and interfacial bonds. In the present work, a study of the main physical processes affecting the quality and reliability of polymer reinforced materials and equipment manufactured from them is carried out. Various types of polymer reinforced systems are considered, as well as the mechanisms by which temperature, moisture, and radiation affect their physicochemical state and operational characteristics. It is shown that these factors can lead to changes in

elastic and strength properties, an increase in material defectiveness, and accelerated aging, which directly affects the durability and functional suitability of the equipment. Within the framework of the study, a generalized methodological approach is proposed that makes it possible to systematize the influence of environmental physical factors on the condition of polymer reinforced materials and to assess their contribution to the degradation of product quality at different stages of the life cycle. The obtained results form a scientific basis for the development of a comprehensive framework for reliability assessment of equipment made of polymer reinforced materials. This work is the first part of a study aimed at developing a unified model for the evolution of the quality of equipment made of polymer reinforced materials, taking into account the combined effects of physical and mechanical factors.

Keywords: *polymer-reinforced materials, equipment reliability, quality management, thermal effects, moisture absorption, radiation exposure.*

BIBLIOGRAPHY

1. Rumyantsev, A. N. Polimernye kompozicionnye materialy i ih primeneniye na praktike / A. N. Rumyantsev, V. N. Filippov // Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki. – 2019. – № 14. – S. 116-121. – EDN JELXRD.
2. Analiz i racionalnyy vybor polimernykh kompozicionnykh materialov dlya izdelij po ih fiziko-mekhanicheskim svoystvam / D. V. Lobanov, S. A. Sidorenko, D. A. Yushchenko, A. V. Bolsheshapova // Aktualnye problemy v mashinostroenii. – 2015. – № 2. – S. 206-212. – EDN TZDYSF.
3. Lotenkova, M. D. Primeneniye polimernykh kompozicionnykh materialov v mostostroenii / M. D. Lotenkova // Sovremennyye tekhnologii v stroitelstve. Teoriya i praktika. – 2021. – T. 2. – S. 306-310. – EDN XXTRFI.
4. Alferov, I. V. Analiz prochnosti i ustojchivosti kompozitnykh stroitelnykh materialov pri dinamicheskikh nagruzkah / I. V. Alferov // Ekonomika stroitelstva. – 2025. – № 2. – S. 421-423. – EDN LMJJFI.
5. Issledovanie vliyaniya masshtabnogo faktora na prochnostnye svoystva polimernykh kompozicionnykh materialov / V. V. Kiryushina, Yu. Yu. Kovaleva, P. A. Stepanov, P. V. Kovalenko // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Yadernaya energetika. – 2019. – № 1. – S. 97-106. – DOI 10.26583/npe.2019.1.09. – EDN INWHJT.
6. Kolomiec, A. V. Vliyanie osobennostey kompozicionnykh materialov na oblast ih primeneniya / A. V. Kolomiec, A. S. Neverov // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport. – 2013. – № 2(27). – S. 91-93. – EDN QKBPUE.
7. Rajak, Dipen Kumar, et al. "Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications." Polymers 11.10 (2019): 1667.
8. Sharma, M., Sharma, R., & Sharma, S. C. (2021). A review on fibres and fillers on improving the mechanical behaviour of fibre reinforced polymer composites. Materials Today: Proceedings, 46, 6482-6489.
9. Benin, M. A., Retnam, B. S. J., Ramachandran, M., Sivapragash, M., & Dhas, J. E. R. (2015). Comparative study of tensile properties on Thermoplastic & Thermosetting polymer composites. International Journal of Applied Engineering Research, 10(11), 10109-10113.
10. Hsieh, T. H., Huang, Y. S., & Shen, M. Y. (2015). Mechanical properties and toughness of carbon aerogel/epoxy polymer composites. Journal of Materials Science, 50(8), 3258-3266.
11. Naufal, M. I., Wong, K. J., Israr, H. A., Nejad, A. F., Rahimian Koloor, S. S., Gan, K. W.,... & Siebert, G. (2024). Digital image correlation technique for failure and crack propagation of fibre-reinforced polymer composites—A review. Composites and Advanced Materials, 33, 26349833241253619.
12. Bakkiyaraj M. et al. Mechanical Behavior and Applications of Hybrid Polymer Composites Reinforced with Natural Fibers: A Narrative Theoretical Review //Solid State Phenomena. – 2025. – T. 369. – S. 17-36.
13. Bochkarev S. V., Salnikov A. F., Galinovsky A. L. An Experimental Study on Residual Stresses and the Evaluation of Performance of Polymer Composite Materials //Mechanics of Composite Materials. – 2023. – T. 59. – №. 5. – S. 977-988.
14. Xavier S. F. (ed.). Thermoplastic polymer composites: processing, properties, performance, applications and recyclability. – John Wiley & Sons, 2022.
15. Shcherban P. S. Razrabotka sistem pokazatelej kachestva polimernykh armirovannykh trub i ih soedinenij. Voprosy matematicheskoy obrabotki dannykh //Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2024. – T. 26. – №. 2 (118). – S. 80-95.soedinenij. Voprosy matematicheskoy obrabotki dannykh //Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii – S. 80-95.

Shcherban Pavel Sergeevich

JSC VNIIST,

Candidate of technical science

Researcher

125319, Moscow, 4th street 8 March, 3, building 1

E-mail: p.Shcherban@vniist.ru

КАРПОВ Д.Ф., ПАВЛОВ М.В., АБРАМОВА Е.В., ЩИПАКОВ Н.А.

ЦИФРОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

Аннотация. Статья посвящена разработке и практической апробации программных решений для контроля тепловой защиты трубопроводных конструкций систем теплоснабжения. В исследовании представлены две программы для определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала на трубопроводе и теплового потока с его поверхности. Методической основой разработанного программного обеспечения являются положения действующих нормативных документов в области теплоснабжения, уравнение теплового баланса, методы расчета коэффициента теплопередачи, гидродинамические принципы и законы. Предложено подробное описание разработанных программ. Приведены примеры применения программных решений для оценки теплотехнических характеристик теплоизоляционных покрытий трубопроводов и расчета величины теплового потока с их поверхности. Показаны результаты практической реализации разработок в решении задач технической диагностики и энергоаудита инженерных систем. Программное обеспечение обладает высокой универсальностью, воспроизводимостью и соответствует требованиям действующей нормативной базы. Созданные цифровые инструменты способствуют автоматизации процессов теплотехнического анализа, что критически важно при новом проектировании, а также оперативном обследовании существующих инженерных систем.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергосбережение, тепловой контроль, цифровые инструменты, программное обеспечение, алгоритм, тепловая изоляция, трубопровод, коэффициент теплопроводности, тепловые потери, тепловой поток, тепловизионная съемка, полевые измерения.

Введение

Оптимизация энергоэффективности инженерных систем занимает центральное место в государственной стратегии, ориентированной на устойчивое развитие и рациональное энергопотребление [1]. В условиях роста стоимости энергоресурсов и ужесточения нормативных требований особую актуальность приобретает разработка доступных и верифицированных программных средств для оперативного и точного определения теплотехнических характеристик теплоизоляции и тепловых потерь инженерных систем [2].

Существующие методы обследования инженерных систем предусматривают применение тепловизионной съемки, а также полевых измерений теплового потока, температур и других параметров, результаты которых требуют корректной программно-математической обработки [3–5]. При этом широко используемые на практике программные комплексы или избыточно сложны, или не предназначены для анализа данных, полученных в условиях эксплуатации. В связи с этим возрастает спрос на специализированные, локальные программные решения, которые могут быть применены инженерами-энергоаудиторами, специалистами по техническому обследованию и проектировщиками [6–9].

По проблеме исследования выполнен обзор источников литературы [10–25]. Оценка информационных ресурсов посвящена методам контроля тепловой защиты инженерных систем теплоснабжения на основе расчета коэффициента теплопроводности и анализа тепловых потоков. Исследования [10–18] фокусируются на расчете теплопроводности различных теплоизоляционных материалов, включая традиционные и инновационные композиты, с учетом факторов эксплуатации и износа, что обеспечивает оптимизацию толщины изоляции и повышение энергоэффективности тепловых систем. В работах [19–25] значительное внимание уделяется методам расчета теплового потока с поверхности трубопроводов, где учитываются геометрические и физические параметры, а также условия теплообмена, позволяякратно снижать тепловые потери.

Анализ работ [10–13] подтверждает отсутствие унифицированных методик и программных инструментов, обеспечивающих применение полученных экспериментальных зависимостей теплопроводности и характеристик тепловой изоляции трубопроводов в инженерных расчетах эксплуатации объектов. В исследованиях [14–16] не реализованы цифровые решения, позволяющие автоматизировать выбор оптимальной теплоизоляции, расчет толщины изоляционного слоя и интеграцию данных тепловизионных обследований и экономической эффективности. Работы [17, 18] не предлагают алгоритмов прогнозирования

износа изоляции и тепловых потерь на основе полевых данных, что ограничивает их практическую значимость и потенциал внедрения в системы теплового контроля.

Исследования [19–23] сосредоточены на теоретических и лабораторных аспектах теплопередачи, однако не учитывают влияние эксплуатационных факторов: старения материалов, загрязнения поверхностей, механических и климатических воздействий, что снижает их практическую применимость. Для большинства работ характерно отсутствие программных инструментов и алгоритмов, позволяющих проводить автоматизированные расчеты и управление тепловыми процессами в условиях эксплуатации. В исследованиях [24, 25] не представлены способы верификации предложенных методов на промышленных объектах, что ограничивает возможность их адаптации к сложным инженерным системам.

Комплексный анализ литературы подтверждает своевременность формирования научно обоснованной методической базы для разработки цифровых инструментов, обеспечивающих эффективный неразрушающий контроль теплотехнических характеристик изоляции трубопроводов, а также техническое состояние объектов инженерной инфраструктуры при процедурах обследования, диагностики, инженерного анализа.

Основная часть

Исследование направлено на разработку и апробацию цифровых инструментов для контроля тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения, так как проблема повышения энергоэффективности требует оперативной и точной диагностики уровня тепловой защиты подобных трубопроводных конструкций. Решение таких задач возможно через применение алгоритмически обоснованных расчетных процедур, реализованных в виде доступных и эффективных программных продуктов.

Цель исследования состоит в разработке и реализации программных средств расчета характеристик тепловой изоляции трубопроводных конструкций систем теплоснабжения с применением нормативных и полевых данных для повышения эффективности технической диагностики и проектных решений, а также улучшения условий эксплуатации.

Объектом исследования являются теплоизолированные трубопроводные конструкции систем теплоснабжения.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы контроля коэффициента теплопроводности тепловой изоляции трубопровода и тепловых потерь с его поверхности на основе разработанных программных средств, реализующих нормативные подходы и натурные эксперименты.

Задачи исследования:

1. Выполнить комплексный анализ существующих методик расчета коэффициента теплопроводности теплоизолированных трубопроводов и тепловых потерь с их поверхности, а также определить наличие, функциональные возможности и ограничения специализированного программного обеспечения, применяемого для решения данных задач.
2. Разработать методику создания цифровых инструментов в виде программных модулей для контроля коэффициента теплопроводности тепловой изоляции и тепловых потерь изолированных трубопроводов систем теплоснабжения, включая алгоритмы обработки данных полевых измерений и интеграцию с нормативными расчетными моделями.

Материалы и методы

В процессе разработки программ учитывались современные требования к точности, воспроизводимости и подтверждаемости результатов. Особенностью разрабатываемых программ является применение в их основе как нормативно-расчетных методов, так и результатов инструментального обследования (включая тепловизионную съемку, измерение плотности теплового потока, температуры). Каждая программа базируется на строго выверенной физико-математической модели теплопередачи. Применение таких моделей позволяет получить обоснованные значения коэффициентов теплопроводности и тепловых потерь с учетом реальных условий эксплуатации объектов контроля (рисунок 1), что способствует созданию базы для принятия адекватных инженерных решений, направленных на повышение энергоэффективности инженерных систем жизнеобеспечения.

Материалы и методы, обеспечивающие общий исследовательский подход для всех предложенных программных решений, представлены в таблице 1 и таблице 2.



а



б



в

Рисунок 1 – Объекты исследования в полевых условиях эксплуатации:
а, б, в – теплоизолированные участки трубопроводов систем теплоснабжения

Таблица 1 – Основные этапы методики разработки цифровых инструментов для теплового контроля изолированных трубопроводов систем теплоснабжения

№	Номер и наименование этапа методики	Описание этапа методики
1	Формализация задач и построение расчетных моделей	На первом этапе для каждой прикладной задачи (определение коэффициента теплопроводности, теплового потока и т. д.) формализуется физико-математическая модель теплопередачи отдельного элемента или всего объекта исследования. Используются уравнения теплопроводности, методы теплового баланса, а также эмпирические зависимости, основанные на экспериментальных и нормативных данных. Особое внимание уделяется граничным условиям, характеру теплопередачи (стационарная или нестационарная) и геометрии объекта исследования
2	Разработка алгоритмов и программная реализация	Для каждой модели разрабатывается алгоритм расчетов, учитывающий структуру входных данных и логическую последовательность вычислений. Программные модули реализуются в среде Excel (Visual Basic for Applications) с возможностью проверки промежуточных результатов. Предусмотрена визуализация полученных результатов расчетов
3	Сбор и подготовка исходных данных	Исходные данные собираются в рамках полевых обследований, лабораторных измерений или извлекаются из нормативной документации. К числу исходных параметров относятся температура, геометрические размеры, характеристики материалов, климатические показатели. Выполняется проверка точности и корректности данных, проводится анализ метрологических характеристик применяемых приборов
4	Проведение расчетов и обработка результатов	На основе введенных исходных данных осуществляется запуск программных расчетов. Полученные значения (коэффициент теплопроводности и тепловой поток) анализируются с инженерно-технической точки зрения. Для каждой задачи возможно построение интерпретационной модели с целью сравнения с нормативными данными и определения соответствия проектным параметрам
5	Валидация результатов и практическая интерпретация	Результаты расчетов сравниваются с данными термографирования, полевых испытаний и/или проектных расчетов. Проводится анализ точности, устойчивости и применимости методик для реальных условий. По итогам оценки формулируются рекомендации по устранению тепловых потерь, корректировке проектных решений, а также по подбору или замене теплоизоляционных материалов, выбору конструктивных решений. Обеспечивается обратная связь между расчетной моделью и результатами обследований

Предложенная методика обеспечивает целостный и унифицированный подход к теплотехнической диагностике и нормированию, объединяя расчетные и инструментальные методы в едином информационном контуре.

Таблица 2 – Методы разработки программного обеспечения для теплового контроля изолированных трубопроводов систем теплоснабжения

№	Номер и наименование метода разработки	Описание метода разработки
1	Общая характеристика программных разработок	Исследование включает описание двух разработанных программных продуктов для повышения точности, надежности и достоверности оценки тепловой защиты трубопроводных конструкций [26, 27]: Программа 1 предназначена для расчета коэффициента теплопроводности тепловой изоляции, расположенной на поверхности трубопровода [26]; Программа 2 предназначена для расчета теплового потока с поверхности изолированного горизонтального трубопровода [27]. Разработанные программы ориентированы на применение в условиях строительной и теплоэнергетической практики, включая обследования существующих инженерных сетей, а также проверку проектных решений
2	Алгоритмическая основа программных продуктов	Разработанные программные решения базируются на комплексе математических моделей, отражающих процессы теплопередачи и конвективного теплообмена в инженерных системах жизнеобеспечения. Программы 1 и 2 реализуют расчеты теплопередачи в трубопроводах цилиндрической формы: Программа 1 основывается на уравнении теплопередачи через двухслойную цилиндрическую стенку в стационарном режиме для определения фактического коэффициента теплопроводности теплоизоляционного слоя. Учет теплоотдачи со стороны теплоносителя и окружающей среды реализуется с использованием критериев Нуссельта, Прандтля, Рейнольдса с поправкой на положение трубопровода в пространстве и режим течения; Программа 2 определяет тепловой поток на основе закона Ньютона-Рихмана и расчетов коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции. В обоих случаях для определения физических свойств теплоносителя и окружающей среды используются эмпирические зависимости, аппроксимированные по справочным данным
3	Используемые исходные данные и экспериментальные измерения	Исходными данными в программах являются измеренные значения температуры воздуха и поверхностей, геометрические параметры конструкции (толщина слоев, диаметры трубопроводов и пр.), а также измеренные или известные физико-технические характеристики теплоносителей и теплоизоляционных материалов. Особое внимание уделяется точности исходных данных. Используемые параметры определяются с применением сертифицированных приборов: термогигрометров, термоанемометров, пирометров, тепловизоров и др. Все измерения сопровождаются учетом метрологических характеристик применяемых средств измерений
4	Программная реализация и используемые языки программирования	Программы 1 и 2 реализованы в среде Microsoft Excel с использованием языка программирования Visual Basic for Applications. Выбор данной среды реализации программных продуктов обеспечивает доступность, простоту ввода данных и прозрачность расчетов
5	Методы верификации и валидации расчетных моделей	Для подтверждения корректности реализованных алгоритмов оптимальным вариантом является применение методов верификации и валидации. Сравнительный анализ расчетных и натурных данных (включая результаты термографических обследований и тепловых испытаний) позволяет установить достаточную степень совпадения между расчетными и измеренными значениями

Унификация алгоритмов позволяет применять программы для анализа отдельных элементов инженерных систем, с взаимной проверкой результатов и формированием обоснованных заключений. Пошаговая структура расчетов обеспечивает использование методики в научных и практических целях, а ее адаптивность – применение к различным типам трубопроводов и условиям эксплуатации.

Результаты и обсуждение

В процессе разработки и апробации программных решений были проведены расчетные исследования, направленные на определение теплотехнических характеристик изоляции трубопроводов систем теплоснабжения в различных эксплуатационных условиях. Полученные результаты демонстрируют потенциал эффективного практического применения разработанного программного обеспечения для решения комплексных задач, связанных с проектированием, теплотехническими обследованиями и эксплуатацией инженерных систем. Представленные программы прошли тестирование на примерах с использованием как нормативных, так и натурных исходных данных.

Таблица 3 – Цифровые инструменты для контроля тепловой защиты трубопроводов систем теплоснабжения

№	Наименование программного обеспечения	Цель, назначение и функциональные возможности программного обеспечения
1	Программа для расчета коэффициента теплопроводности тепловой изоляции на поверхности трубопровода (Программа 1)	Цель и назначение: определение фактического значения коэффициента теплопроводности слоя тепловой изоляции на поверхности трубопровода круглого сечения в натуральных условиях; оценка динамики изменения теплоизоляционных качеств утеплителя в течение всего эксплуатационного периода. Функциональные возможности: Блок 1 предназначен для ручного ввода геометрических, теплотехнических и температурных параметров трубопровода, тепловой изоляции и теплоносителя, включая массовый расход; Блок 2 автоматически рассчитывает физические свойства теплоносителя на основе аппроксимированных справочных зависимостей; Блок 3 содержит автоматически определяемые физические характеристики окружающей среды на основе введенных исходных данных; Блок 4 выполняет автоматический расчет коэффициента теплоотдачи от теплоносителя к внутренней поверхности трубопровода с учетом режима течения; Блок 5 определяет коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности тепловой изоляции к воздуху с учетом ориентации трубопровода; Блок 6 реализует автоматизированный расчет коэффициента теплопроводности теплоизоляционного слоя по уравнению теплопередачи для цилиндрической оболочки
2	Программа для расчета теплового потока с поверхности горизонтального трубопровода (Программа 2)	Цель и назначение: определение фактических потерь теплоты с поверхности горизонтального трубопровода цилиндрической формы; расчет теплового потока как для неутепленного трубопровода, так и для изолированной трубопроводной конструкции; в основе расчета лежат классические уравнения теплообмена и теории подобия тепловых процессов. Функциональные возможности: Блок 1 предназначен для ручного ввода исходных геометрических и температурных параметров трубопровода, тепловой изоляции и окружающей среды; Блок 2 автоматически определяет физические свойства воздуха на основе аппроксимированных справочных данных после ввода исходных параметров; Блок 3 выполняет автоматический расчет безразмерного коэффициента теплоотдачи (числа Нуссельта) для условий свободной конвекции; Блок 4 рассчитывает величину теплового потока с поверхности трубопровода на основе уравнения Ньютона-Рихмана для конвективного теплообмена

Разработанные программные решения реализованы по модульному принципу, что обеспечивает прозрачность вычислительных процедур, воспроизводимость результатов и возможность независимой проверки отдельных блоков. Архитектура программ ориентирована на решение прикладных задач теплотехнического контроля и диагностики. Уровень ввода данных формализует исходную информацию, получаемую как из нормативных источников, так и из инструментальных обследований. Вычислительное ядро объединяет алгоритмические модули для расчета теплофизических свойств, коэффициентов теплоотдачи, реализации уравнений теплопередачи и автоматизированного вычисления диагностических параметров.

Формализация алгоритмов в представленных программных решениях заключается в последовательной реализации взаимосвязанных этапов: обработке исходных измерений, расчетном определении теплообменных параметров, учете реальных граничных условий и вычислении диагностических величин. Отличие предложенного подхода от существующих традиционных методик состоит в адаптации классических расчетных зависимостей к задачам технической диагностики, в использовании обратных вычислительных процедур и в объединении нормативных и экспериментальных данных в едином алгоритмическом контуре. Это обеспечивает возможность определения фактических теплотехнических характеристик объектов контроля, что принципиально расширяет прикладные возможности методики.

Таблица 3 содержит описание разработанного программного обеспечения.

Таблица 4 содержит описание алгоритма функционирования программы расчета коэффициента теплопроводности слоя тепловой изоляции на трубопроводе (Программа 1).

Таблица 4 – Алгоритм Программы 1

№	Этап алгоритма	Содержание вычислительных процедур алгоритма
1	Ввод исходных данных (Блок 1)	Ручной ввод геометрических и теплотехнических параметров трубопровода и теплоизоляционного слоя, температуры стенки теплоносителя, температуры окружающей среды и приближенной внутренней температуры трубопровода, а также массового расхода теплоносителя для определения гидродинамических характеристик потока
2	Определение физических свойств теплоносителя (Блок 2)	Автоматический расчет теплофизических свойств теплоносителя на основе введенных исходных данных и аппроксимированных справочных зависимостей. Полученные значения используются в последующих расчетах теплообмена
3	Определение физических свойств окружающей среды (Блок 3)	Автоматическое вычисление физических характеристик воздуха на основе аппроксимированных зависимостей. Данные блоки интегрированы с блоком исходных данных и обеспечивают корректность расчета конвективного теплообмена
4	Расчет теплообмена между теплоносителем и внутренней поверхностью трубопровода (Блок 4)	Автоматическое определение коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности трубопровода с учетом характеристик потока теплоносителя (ламинарное или турбулентное течение) и геометрии трубопровода
5	Расчет теплообмена между наружной поверхностью тепловой изоляции и окружающей средой (Блок 5)	Автоматическое определение коэффициента теплоотдачи на внешней поверхности тепловой изоляции с учетом ориентации трубопровода (горизонтальное или вертикальное) и условий свободной конвекции
6	Определение коэффициента теплопроводности тепловой изоляции (Блок 6)	На основании уравнения теплопередачи для двухслойной цилиндрической стенки при стационарном режиме вычисляется фактический коэффициент теплопроводности слоя тепловой изоляции. Результат отражает действительные теплотехнические характеристики изоляционного материала и позволяет анализировать динамику его изменения в течение эксплуатации

Таблица 5 содержит описание алгоритма функционирования программы расчета теплового потока с поверхности горизонтального трубопровода (Программа 2).

Таблица 5 – Алгоритм Программы 2

№	Этап алгоритма	Содержание вычислительных процедур алгоритма
1	Ввод исходных данных (Блок 1)	Пользователь вручную задает геометрические параметры трубопровода и тепловой изоляции (при ее наличии), а также температурные характеристики: температуру наружной поверхности трубопровода или изоляции и температуру окружающей среды. Наружный диаметр тепловой изоляции определяется расчетным путем на основе введенных параметров
2	Определение теплофизических свойств воздуха (Блок 2)	После ввода исходных данных автоматически вычисляются физические свойства окружающей среды (воздуха). Расчет выполняется с использованием аппроксимированных зависимостей, полученных на основе справочных данных
3	Расчет параметров свободной конвекции. Определение коэффициента теплоотдачи (Блок 3)	Автоматически определяется режим теплообмена при свободной конвекции между наружной поверхностью трубопровода (или изоляции) и воздухом. Вычисляется безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта), характеризующий интенсивность конвективного теплообмена. На основе рассчитанного числа Нуссельта и теплофизических свойств воздуха определяется коэффициент теплоотдачи от поверхности трубопровода к окружающей среде
4	Расчет теплового потока (Блок 4)	С использованием коэффициента теплоотдачи и температурного напора автоматически вычисляется плотность теплового потока (тепловые потери) с поверхности горизонтального трубопровода в соответствии с законом конвективного теплообмена

Рисунок 2 содержит пример автоматизированного программного расчета коэффициента теплопроводности тепловой изоляции на поверхности трубопровода (Программа 1).

№ п/п	Наименование величины	Условное обозначение	Значение	Единица измерения
Блок 1. Исходные данные				
1.	Внутренний диаметр трубопровода	$d_{вн}$	238	мм
2.	Наружный диаметр трубопровода	$d_{н}$	250	мм
3.	Толщина слоя тепловой изоляции	$\delta_{из}$	2,2	мм
4.	Диаметр тепловой изоляции	$d_{из}$	254,4	мм
5.	Длина или высота участка трубопровода	l или h	11	м
6.	Положение трубопровода относительно поверхности земли (горизонтальное или вертикальное)	горизонтальное		
7.	Коэффициент теплопроводности трубопровода	λ	50,2	Вт/(м·°C)
8.	Температура на внутренней поверхности трубопровода (приближенное значение)	$t'_{с1}$	77,0	°C
9.	Температура на поверхности изолированного трубопровода	$t_{с2}$	44,3	°C
10.	Температура теплоносителя (воды)	$t_{ж1}$	77	°C
11.	Температура окружающей среды (воздуха)	$t_{ж2}$	24	°C
12.	Расход теплоносителя	G	250	т/ч
Блок 2. Физические свойства теплоносителя (воды)				
1.	Плотность	ρ	973,77	кг/м³
2.	Коэффициент кинематической вязкости	$\nu \cdot 10^{-6}$	0,381	м²/с
3.	Коэффициент теплопроводности	$\lambda_{ж}$	0,667	Вт/(м·°C)
4.	Число Прандтля (при температуре жидкости)	$Pr_{ж}$	2,358	—
5.	Число Прандтля (при температуре стенки)	$Pr_{с}$	2,358	—
Блок 3. Физические свойства окружающей среды (воздуха)				
1.	Температурный коэффициент объемного расширения	$\beta_{ж}$	0,00337	1/K
2.	Коэффициент кинематической вязкости	$\nu \cdot 10^{-6}$	15,57	м²/с
3.	Коэффициент теплопроводности	$\lambda_{ж} \cdot 10^{-2}$	2,62	Вт/(м·°C)
4.	Число Прандтля (при температуре жидкости)	$Pr_{ж}$	0,703	—
5.	Число Прандтля (при температуре стенки)	$Pr_{с}$	0,698	—
Блок 4. Блок расчетных значений (теплоноситель)				
1.	Отношение длины участка к внутреннему диаметру трубопровода	$l/d_{вн}$	46,2	—
2.	Средняя скорость движения теплоносителя	w	1,603	м/с
3.	Число Рейнольдса	$Re_{д,ж} \cdot 10^6$	1,002	—
4.	Режим течения теплоносителя	турбулентный		
5.	Число Нуссельта	$Nu_{д,ж}$	1919	—
6.	Коэффициент теплоотдачи	α_1	5379	Вт/(м²·°C)
Блок 5. Блок расчетных значений (окружающая среда)				
1.	Число Грасгофа	$Gr_{д,ж} \cdot 10^9$	0,046	—
2.	Число Релея	$Ra_{д,ж} \cdot 10^9$	0,032	—
3.	Режим течения воздуха	ламинарный		
4.	Число Нуссельта	$Nu_{д,ж}$	37,7	—
5.	Коэффициент теплоотдачи	α_2	3,88	Вт/(м²·°C)
Блок 6. Блок расчетных значений (тепловая изоляция)				
1.	Линейная плотность теплового потока	q_l	62,9	Вт/м
2.	Температура на внутренней поверхности трубопровода (уточненное значение)	$t_{с1}$	77,0	°C
3.	Коэффициент теплопроводности	$\lambda_{из}$	0,005	Вт/(м·°C)

Рисунок 2 – Результаты расчета коэффициента теплопроводности тепловой изоляции на поверхности трубопровода

Рисунок 3 содержит пример автоматизированного программного расчета теплового потока с поверхности горизонтального трубопровода (Программа 2).

Рисунок 4 демонстрирует некоторые результаты качественного анализа термограмм теплоизолированных участков трубопроводов систем теплоснабжения при проверке разработанных программ.

№ п/п	Наименование величины	Условное обозначение	Значение	Единица измерения
Блок 1. Исходные данные				
1.	Наружный диаметр трубопровода*	d_n	250	мм
2.	Толщина слоя тепловой изоляции*	$\delta_{из}$	50	мм
3.	Наружный диаметр тепловой изоляции	$d_{из}$	350	мм
4.	Длина горизонтального участка трубопровода*	l	25	м
5.	Температура на поверхности изолированного трубопровода*	t_c	60	°C
6.	Температура окружающей среды (воздуха)*	$t_{ж}$	-30	°C
Блок 2. Физические свойства окружающей среды (воздуха)				
1.	Температурный коэффициент объемного расширения	$\beta_{ж}$	0,00411	1/К
2.	Коэффициент кинематической вязкости	$\nu \cdot 10^5$	10,72	м²/с
3.	Коэффициент теплопроводности	$\lambda_{ж} \cdot 10^2$	2,21	Вт/(м·°C)
4.	Число Прандтля (при температуре воздуха)	$Pr_{ж}$	0,721	—
5.	Число Прандтля (при температуре стенки)	Pr_c	0,695	—
Блок 3. Блок расчетных значений окружающей среды (воздуха)				
1.	Число Грасгофа	$Gr_{дн} \cdot 10^{-9}$	1,354	—
2.	Число Рейля	$Ra_{дн} \cdot 10^{-9}$	0,976	—
3.	Число Нуссельта	$Nu_{дн}$	89	—
Блок 4. Блок расчетных значений (тепловой поток)				
1.	Коэффициент теплоотдачи	α	5,64	Вт/(м²·°C)
2.	Площадь поверхности изолированного трубопровода	F	27,49	м²
3.	Тепловой поток	Q	13,96	кВт

Рисунок 3 – Результаты расчета теплового потока с поверхности горизонтального трубопровода

Программа 1 обеспечила выполнение расчета коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала на поверхности трубопровода, эксплуатируемого в полевых условиях (рисунок 1а, б). Объектом исследования являлась керамическая тепловая изоляция (термокраска), смонтированная на участке трубопровода (рисунок 4а, б). Полученное значение коэффициента теплопроводности ($\lambda_{из}$, Вт/(м·К)) керамической тепловой изоляции, равное 0,005 Вт/(м·К) (рисунок 2), находится в пределах допустимого диапазона величин для данного класса материалов и демонстрирует высокую степень совпадения с данными завода-изготовителя в реальных условиях эксплуатации.

Программа 2 позволила рассчитать величину теплового потока (Q , кВт) с поверхности теплоизолированного трубопровода (рисунок 1в, рисунок 4в), равную 13,96 кВт (рисунок 3). При отсутствии тепловой изоляции на поверхности трубопровода и температуре (t_c , °C) на его поверхности 90°C, величина теплового потока возрастет на 10,28% и составит 15,56 кВт.

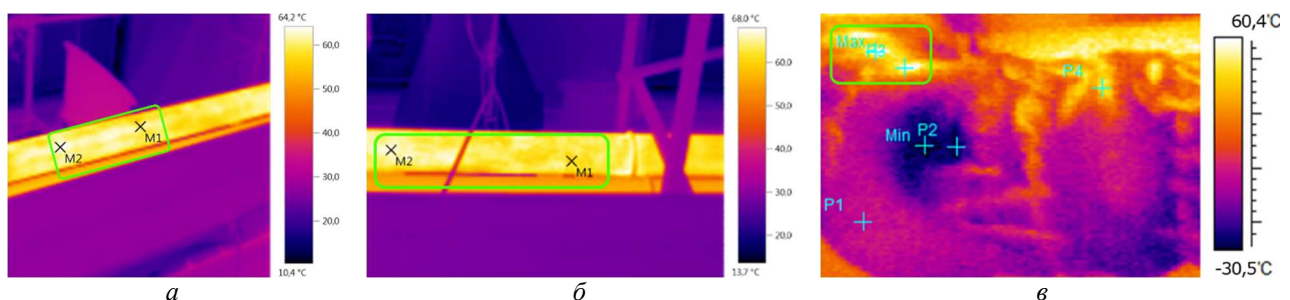


Рисунок 4 – Термограммы теплоизолированных участков трубопроводов для проверки работоспособности разработанного программного обеспечения:

а, б – термограммы для тестирования Программы 1; в – термограмма для тестирования Программы 2

Разработанное программное обеспечение подтвердило свою эффективность. Представленные программы обеспечивают количественную оценку теплотехнических характеристик и тепловых потерь с высокой степенью достоверности. Автоматизация расчетов сокращает трудоемкость теплотехнического анализа и минимизирует риск ошибок при обработке данных, полученных в лабораторных или полевых условиях. Полученные результаты подтверждают, что предложенные программные решения могут стать частью цифровой инфраструктуры энергоэффективного строительства, а также последующей безопасной и длительной эксплуатации инженерных систем жизнеобеспечения.

Заключение

Исследование направлено на разработку и последующее внедрение цифровых инструментов, обеспечивающих автоматизацию теплотехнических расчетов и обработку

полевых данных, что способствует повышению энергоэффективности инженерных систем и их соответствию современным нормативным требованиям.

Основные выводы по результатам работы:

1. Анализ современных методик расчета теплопроводности тепловой изоляции и тепловых потерь трубопроводов выявил их ориентацию на нормативные расчеты и отсутствие цифровых инструментов для автоматизированного анализа данных полевых измерений.

2. Разработанная методика обеспечивает интеграцию нормативных моделей, расчетных алгоритмов и данных измерений, что позволяет перейти от ручных расчетов к воспроизводимому автоматизированному теплотехническому контролю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табунщиков, Ю.А. Энергоэффективные здания в России: настоящее и будущее. К двадцатилетнему юбилею монографии «Энергоэффективные здания» / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н.В. Шилкин // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2024. – № 1. – С. 4–13.
2. Vrusho, Borianana and Golgota, Alma and Dhoska, Klodian and Abotaleb, Mostafa. Improving energy efficiency strategy in residential buildings // Jurnal Ilmiah Ilmu Terapan Universitas Jambi (JIITUJ). – 2025. – 380–392. <https://doi.org/10.22437/jiituj.v9i1.37924>.
3. Lin, Dong and Yang, Na and Miao, Qi and Cui, Xiaojie and Xu, Dinggen. True 3D thermal inspection of buildings using multimodal UAV images // Journal of Building Engineering. – 2025. – 100. – 111806. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2025.111806>.
4. Nazira, Askerbaeva and Mahfuza, Bozorboyeva and Nasiba, Sayimbetova. Modern methods for improving thermal insulation in buildings // American Journal of Applied Science and Technology. – 2025. – 5. – 46–47. <https://doi.org/10.37547/ajast/Volume05Issue03-09>.
5. He, Yinglong and Pan, Jiayu and Debnath, Ramit and Bardhan, Ronita and Cullen, Luke and Jenkins, Marco and Mackie, Erik and Hawker, George and Parry, Ian. Energy mapping of existing building stock in Cambridge using energy performance certificates and thermal infrared imagery // Environmental Data Science. – 2025. – 3. <https://doi.org/10.1017/eds.2024.26>.
6. Amoo, Charles and Eckman, Bill and New, Joshua. A multicriteria framework for assessing energy audit software for low-income households in the United States // Energy Efficiency. – 2025. – 18. – 21. <https://doi.org/10.1007/s12053-025-10295-4>.
7. Zhao, Meijiu and Zhao, Xiaochun. A case study on the calculation of carbon emissions over the entire life cycle of commercial office buildings based on measured data // Energy Informatics. – 2025. – 8. <https://doi.org/10.1186/s42162-025-00527-3>.
8. Shevchenko, Olena and Shevchenko, Dmytro and Shovkaliuk, Maryna. Energy modeling of energy consumption by a modern university building under various scenarios of engineering systems modernization // Power Engineering: economics, technique, ecology. – 2025. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2025.327136>.
9. Shovkaliuk, Maryna and Rabenko, Yevhenii and Yatsenko, Olena. Modeling of energy consumption indicators of an apartment building using specialized software products // Power Engineering: economics, technique, ecology. – 2025. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324191>.
10. Bazukova, Elvira and Vankov, Yu and Gaponenko, S.O. and Smirnov, N.N. Study of thermal conductivity coefficient of basalt fiber insulation at various temperature conditions // Vestnik IGEU. – 2021. – 15–24. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2021.4.015-024>.
11. Ganzha, Anton and Kornelyuk, Viktoriia and Marchenko, Natalia. Analytical solution of the differential equation of heat conductivity for damaged thermal insulation of pipelines // Power Engineering: economics, technique, ecology. – 2024. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297588>.
12. Pascal, M.A.V. and Kuleshov, A.I. and Ogunsola, A.T. and Hasanov, R.R. and Kantemirov, I.F. Investigating the long-term effectiveness of pipeline thermal insulation: a study of density, moisture content, and thermal conductivity // Problems of Gathering Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. – 2024. – 206–217. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2024-6-206-217>.
13. Zulkefli, Nurfarah and Pao, William. Optimum thermal insulation design for subsea pipeline flow assurance. – 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33853.05603>.
14. Anisimova, Elena. Methodology for calculating the ineffective diameter of thermal insulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 962. – 032001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/3/032001>.
15. Erdenechuluun, Chantsaldulam and Dugargaramjav, Tserendolgor. Energy-efficient thermal insulation material for district heating pipelines // International Journal of Materials Science and Applications. – 2025. – 14. – 67–71. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20251403.12>.
16. Liu, Xinyu and Xin, Shengwei and Zhou, Pin. Study on energy-saving thermal insulation effect of high-temperature steam pipelines in thermal power plants using nanoporous aerogel super insulation technology // Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. – 2025. <https://doi.org/10.2478/amns-2025-0733>.
17. Lin, Junguang and Zhao, Jianfa and Wang, Xiaotian and Chen, Kailun and Zhang, Liang. Field experimental investigation of the insulation deterioration characteristics of overhead pipeline for steam heating network // Journal of Enhanced Heat Transfer. – 2024. 31. <https://doi.org/10.1615/JEnhHeatTransf.2024051807>.

18. Tsapko, Yuriy and Kasianchuk, Ivan and Likhnyovskyi, Ruslan and Tsapko, Oleksii and Kovalenko, Vitalii and Nizhnyk, Vadym and Bedratiuk, Olga and Sukhanevych, Maryna. Determining thermal and physical characteristics of wood polymer material for pipeline thermal insulation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – 5. – 63–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289341>.
19. Wang, Deming. Heat loss along the pipeline and its control measures // SN Applied Sciences. – 2022. – 5. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05226-2>.
20. Krashchenko, Vladislav and Tretyakov, Nikita and Chernov, Alexander and Shaykhalov, Ilmir and Zhukov, Alexey. Modeling and thermal calculation of a pipeline insulation system // E3S Web of Conferences. – 2020. – 164. – 14021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016414021>.
21. Zainullina, Elza and Mityakov, Vladimir. Heat transfer investigation during condensation on the horizontal pipe // Inventions. – 2022. – 8. – 2. <https://doi.org/10.3390/inventions8010002>.
22. Kostov, Konstantin and Ivanov, Ivan and Atanasov, Koycho and Nikolov, Chavdar and Kalchev, Stefan. Experimental determination of the heat exchange coefficient of industrial steam pipelines // EUREKA: Physics and Engineering. – 2022. – 55–66. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002473>.
23. Sapozhnikov, S. and Mityakov, V. and Mityakov, Andrey and Babich, Alexander and Zainullina, Elza. The study of heat flux measurement for heat transfer during condensation at pipe surfaces // Technical Physics Letters. – 2019. – 45. – 321–323. <https://doi.org/10.1134/S1063785019040163>.
24. Onokoko, Landa and Galanis, Nicolas and Poncet, Sébastien and Poirier, Michel. Heat transfer of ice slurry flows in a horizontal pipe: a numerical study // International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – 142. – 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.04.004>.
25. Stubblefield, Michael and Pang, Su-Seng and Cundy, Vic. Heat loss in insulated pipe – The influence of thermal contact resistance: a case study // Composites Part B: Engineering. – 1996. – 27. – 85–93. [https://doi.org/10.1016/1359-8368\(95\)00028-3](https://doi.org/10.1016/1359-8368(95)00028-3).
26. Павлов, М.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611555. Программа для расчета коэффициента теплопроводности тепловой изоляции на поверхности трубопровода: № 2021610623: заявл. 26.01.2021: опубл. 01.02.2021. Бюл. № 2 / М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов, В.П. Березина; правообладатель Вологодский государственный университет. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24229.92646>.
27. Павлов, М.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665027. Программа для расчета теплового потока с поверхности горизонтального трубопровода: № 2023664316: заявл. 10.07.2023: опубл. 11.07.2023. Бюл. № 7 / М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов, В.А. Писаренко; правообладатель Вологодский государственный университет. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12263.05287>.

Карпов Денис Федорович

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда;
 ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва
 Старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения; соискатель ученой степени кандидата технических наук, кафедра сварки, диагностики и специальной робототехники
 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15;
 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
 Тел.: +7 (8172) 72-46-45
 E-mail: karpovdf@vogu35.ru

Абрамова Елена Вячеславовна

ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва
 Доктор технических наук, профессор кафедры сварки, диагностики и специальной робототехники
 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
 E-mail: e.v.abramova11@yandex.ru

Павлов Михаил Васильевич

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда
 Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения
 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15
 Тел.: +7 (8172) 72-46-45
 E-mail: pavlovmv@vogu35.ru

Щипаков Никита Андреевич

ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва
 Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварки, диагностики и специальной робототехники
 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
 E-mail: shchipak@yandex.ru

KARPOV D.F., PAVLOV M.V., ABRAMOVA E.V., SHCHIPAKOV N.A.

DIGITAL TOOLS FOR PIPELINE THERMAL INSULATION MONITORING

Abstract. The article is devoted to the development and practical validation of software solutions for monitoring the thermal protection of pipeline structures in district heating systems. The study presents two software tools designed to determine the thermal conductivity of pipeline insulation materials and the heat flux from pipeline surfaces. The methodological framework of the developed software is based on the provisions of current regulatory documents in the

field of heat supply, the heat balance equation, methods for calculating heat transfer coefficients, as well as hydrodynamic principles and laws. A detailed description of the developed programs is provided. Examples of the application of the software solutions for assessing the thermophysical performance of pipeline insulation systems and for calculating surface heat flux are presented. The results of practical implementation of the developed tools in technical diagnostics and energy auditing of engineering systems are demonstrated. The software exhibits a high degree of versatility and reproducibility and complies with the requirements of the applicable regulatory framework. The developed digital tools facilitate the automation of thermotechnical analysis, which is critically important both for new design and for the operational assessment of existing engineering systems.

Keywords: *energy efficiency, energy saving, thermal control, digital tools, software, algorithm, thermal insulation, pipeline, thermal conductivity coefficient, heat losses, heat flux, thermographic imaging, field measurements.*

BIBLIOGRAPHY

1. Tabunshnikov, Yu.A. E'nergoe'ffektivny'e zdaniya v Rossii: nastoyashhee i budushhee. K dvadczatiletnemu yubileyu monografii «E'nergoe'ffektivny'e zdaniya» / Yu.A. Tabunshnikov, M.M. Brodach, N.V. Shilkin // AVOK: Ventilyaciya, otoplenie, kondicionirovanie vozduxa, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika. – 2024. – Nomer 1. – S. 4–13.
2. Vrusho, Borianana and Golgota, Alma and Dhoska, Klodian and Abotaleb, Mostafa. Improving energy efficiency strategy in residential buildings // Jurnal Ilmiah Ilmu Terapan Universitas Jambi (JIITUJ). – 2025. – 380–392. <https://doi.org/10.22437/jiituj.v9i1.37924>.
3. Lin, Dong and Yang, Na and Miao, Qi and Cui, Xiaojie and Xu, Dinggen. True 3D thermal inspection of buildings using multimodal UAV images // Journal of Building Engineering. – 2025. – 100. – 111806. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.111806>.
4. Nazira, Askerbaeva and Mahfuza, Bozorboyeva and Nasiba, Sayimbetova. Modern methods for improving thermal insulation in buildings // American Journal of Applied Science and Technology. – 2025. – 5. – 46–47. <https://doi.org/10.37547/ajast/Volume05Issue03-09>.
5. He, Yinglong and Pan, Jiayu and Debnath, Ramit and Bardhan, Ronita and Cullen, Luke and Jenkins, Marco and Mackie, Erik and Hawker, George and Parry, Ian. Energy mapping of existing building stock in Cambridge using energy performance certificates and thermal infrared imagery // Environmental Data Science. – 2025. – 3. <https://doi.org/10.1017/eds.2024.26>.
6. Amoo, Charles and Eckman, Bill and New, Joshua. A multicriteria framework for assessing energy audit software for low-income households in the United States // Energy Efficiency. – 2025. – 18. – 21. <https://doi.org/10.1007/s12053-025-10295-4>.
7. Zhao, Meijiu and Zhao, Xiaochun. A case study on the calculation of carbon emissions over the entire life cycle of commercial office buildings based on measured data // Energy Informatics. – 2025. – 8. <https://doi.org/10.1186/s42162-025-00527-3>.
8. Shevchenko, Olena and Shevchenko, Dmytro and Shovkaliuk, Maryna. Energy modeling of energy consumption by a modern university building under various scenarios of engineering systems modernization // Power Engineering: economics, technique, ecology. – 2025. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2025.327136>.
9. Shovkaliuk, Maryna and Rabenko, Yevhenii and Yatsenko, Olena. Modeling of energy consumption indicators of an apartment building using specialized software products // Power Engineering: economics, technique, ecology. – 2025. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324191>.
10. Bazukova, Elvira and Vankov, Yu and Gaponenko, S.O. and Smirnov, N.N. Study of thermal conductivity coefficient of basalt fiber insulation at various temperature conditions // Vestnik IGEU. – 2021. – 15–24. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2021.4.015-024>.
11. Ganzha, Anton and Kornelyuk, Viktoriia and Marchenko, Natalia. Analytical solution of the differential equation of heat conductivity for damaged thermal insulation of pipelines // Power Engineering: economics, technique, ecology. – 2024. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297588>.
12. Pascal, M.A.V. and Kuleshov, A.I. and Ogunsola, A.T. and Hasanov, R.R. and Kantemirov, I.F. Investigating the long-term effectiveness of pipeline thermal insulation: a study of density, moisture content, and thermal conductivity // Problems of Gathering Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. – 2024. – 206–217. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2024-6-206-217>.
13. Zulkefli, Nurfarah and Pao, William. Optimum thermal insulation design for subsea pipeline flow assurance. – 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33853.05603>.
14. Anisimova, Elena. Methodology for calculating the ineffective diameter of thermal insulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 962. – 032001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/3/032001>.
15. Erdenechuluun, Chantsaldulam and Dugargaramjav, Tserendolgor. Energy-efficient thermal insulation material for district heating pipelines // International Journal of Materials Science and Applications. – 2025. – 14. – 67–71. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20251403.12>.
16. Liu, Xinyu and Xin, Shengwei and Zhou, Pin. Study on energy-saving thermal insulation effect of high-temperature steam pipelines in thermal power plants using nanoporous aerogel super insulation technology // Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. – 2025. <https://doi.org/10.10247/amns-2025-0733>.
17. Lin, Junguang and Zhao, Jianfa and Wang, Xiaotian and Chen, Kailun and Zhang, Liang. Field experimental investigation of the insulation deterioration characteristics of overhead pipeline for steam heating network // Journal of Enhanced Heat Transfer. – 2024. 31. <https://doi.org/10.1615/JEnhHeatTransf.2024051807>.

18. Tsapko, Yuriy and Kasianchuk, Ivan and Likhnyovskyi, Ruslan and Tsapko, Oleksii and Kovalenko, Vitalii and Nizhnyk, Vadym and Bedratiuk, Olga and Sukhanevych, Maryna. Determining thermal and physical characteristics of wood polymer material for pipeline thermal insulation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – 5. – 63–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289341>.
19. Wang, Deming. Heat loss along the pipeline and its control measures // SN Applied Sciences. – 2022. – 5. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05226-2>.
20. Krashchenko, Vladislav and Tretyakov, Nikita and Chernov, Alexander and Shaykhalov, Ilmir and Zhukov, Alexey. Modeling and thermal calculation of a pipeline insulation system // E3S Web of Conferences. – 2020. – 164. – 14021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016414021>.
21. Zainullina, Elza and Mityakov, Vladimir. Heat transfer investigation during condensation on the horizontal pipe // Inventions. – 2022. – 8. – 2. <https://doi.org/10.3390/inventions8010002>.
22. Kostov, Konstantin and Ivanov, Ivan and Atanasov, Koycho and Nikolov, Chavdar and Kalchev, Stefan. Experimental determination of the heat exchange coefficient of industrial steam pipelines // EUREKA: Physics and Engineering. – 2022. – 55–66. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002473>.
23. Sapozhnikov, S. and Mityakov, V. and Mityakov, Andrey and Babich, Alexander and Zainullina, Elza. The study of heat flux measurement for heat transfer during condensation at pipe surfaces // Technical Physics Letters. – 2019. – 45. – 321–323. <https://doi.org/10.1134/S1063785019040163>.
24. Onokoko, Landa and Galanis, Nicolas and Poncet, Sébastien and Poirier, Michel. Heat transfer of ice slurry flows in a horizontal pipe: a numerical study // International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – 142. – 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.04.004>.
25. Stubblefield, Michael and Pang, Su-Seng and Cundy, Vic. Heat loss in insulated pipe – The influence of thermal contact resistance: a case study // Composites Part B: Engineering. – 1996. – 27. – 85–93. [https://doi.org/10.1016/1359-8368\(95\)00028-3](https://doi.org/10.1016/1359-8368(95)00028-3).
26. Pavlov, M.V. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy` dlya E`VM nomer 2021611555. Programma dlya rascheta koe`fficienta teploprovodnosti teplovoj izolyacii na poverxnosti truboprovoda: nomer 2021610623: zayavl. 26.01.2021: opubl. 01.02.2021. Byul. nomer 2 / M.V. Pavlov, D.F. Karpov, V.P. Berezina; pravoobladatel` Vologodskij gosudarstvenny`j universitet. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24229.92646>.
27. Pavlov, M.V. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy` dlya E`VM nomer 2023665027. Programma dlya rascheta teplovogo potoka s poverxnosti gorizonta`l'nogo truboprovoda: nomer 2023664316: zayavl. 10.07.2023: opubl. 11.07.2023. Byul. nomer 7 / M.V. Pavlov, D.F. Karpov, V.A. Pisarenko; pravoobladatel` Vologodskij gosudarstvenny`j universitet. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12263.05287>.

Karpov Denis Fedorovich

Vologda State University;
Federal State Autonomous Educational Institution of
Higher Education «Bauman Moscow State Technical
University»
Senior Lecturer of the Department of Heat, Gas and
Water Supply; Applicant for the Degree of Candidate of
Technical Sciences, Department of Welding, Diagnostics
and Special Robotics
160000, Vologda, 15, Lenin Street;
105005, Moscow, 5, 2nd Baumanskaya Street, Building
1
Tel.: +7 (8172) 72-46-45
E-mail: karpovdf@vogu35.ru

Abramova Elena Vyacheslavovna

Federal State Autonomous Educational Institution of
Higher Education «Bauman Moscow State Technical
University»
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the
Department of Welding, Diagnostics and Special
Robotics
105005, Moscow, 5, 2nd Baumanskaya Street, Building
1
E-mail: e.v.abramova11@yandex.ru

Pavlov Mikhail Vasilyevich

Vologda State University
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Heat, Gas and
Water Supply
160000, Vologda, 15, Lenin Street
Tel.: +7 (8172) 72-46-45
E-mail: pavlovmv@vogu35.ru

Shchipakov Nikita Andreevich

Federal State Autonomous Educational Institution of
Higher Education «Bauman Moscow State Technical
University»
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Welding,
Diagnostics and Special Robotics
105005, Moscow, 5, 2nd Baumanskaya Street, Building
1
E-mail: shchipak@yandex.ru

АНЦЕВ А.В., АНЦЕВА Н.В., КАРАВДИН Л.А., ЯНОВ Е.С.

ОЦЕНКА ОБЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается подход к оценке общей эффективности оборудования (ОЕЕ) с использованием информационно-измерительной системы (ИИС) косвенного контроля технологического оборудования. Цель исследования - повышение ОЕЕ за счёт мониторинга состояния оборудования на основе анализа вибрационных сигналов и электропотребления без необходимости подключения к системе числового программного управления (СЧПУ). Предложена архитектура ИИС, включающая датчики вибрации и тока, устройства сбора данных и сервер для обработки информации с применением методов машинного обучения. Описаны методы расчёта доступности, производительности и качества оборудования, а также автоматизированного определения ОЕЕ. Приведены результаты внедрения ИИС на машиностроительных предприятиях, показавшие увеличение коэффициента готовности оборудования на 10,5%, коэффициента производительности на 4,7% и коэффициента качества продукции на 28,5%. Система позволяет снизить простои, сократить брак и уменьшить непроизводственные затраты, что способствует повышению экономической эффективности производства в условиях импортозамещения и санкционного давления.

Ключевые слова: общая эффективность оборудования (ОЕЕ), информационно-измерительная система, косвенный контроль, технологическое оборудование, вибрационный сигнал, электропотребление, технологическая дисциплина.

Введение

Современные машиностроительные производства сталкиваются с необходимостью постоянного повышения эффективности использования оборудования в условиях ужесточающихся требований к производительности, качеству выпускаемой продукции и ресурсосбережению, особенно остро эта проблема воспринимается в контексте импортозамещения и санкционного давления.

Общая эффективность оборудования (ОЕЕ) – это ключевой показатель, используемый для оценки производительности и эффективности работы оборудования. ОЕЕ учитывает три основных фактора: доступность (Availability), производительность (Performance) и качество (Quality) [1-4]. В условиях современных машиностроительных производств, где важно минимизировать потери и максимизировать эффективность использования ресурсов, ОЕЕ становится важным инструментом для анализа и улучшения производственных процессов [5, 6]. Однако традиционные методы мониторинга, например, [7], требующие подключения к системам числового программного управления (СЧПУ) технологического оборудования, не всегда применимы, особенно в условиях, когда оборудование является объектом критической информационной инфраструктуры (КИИ) [8]. В связи с этим возникает необходимость разработки альтернативных методов контроля, таких как косвенный контроль на основе мониторинга и анализа вибрационных сигналов и электропотребления [9, 10].

Архитектура предлагаемой информационно-измерительной системы

В рамках проведённых работ и исследований была разработана информационно-измерительная система (ИИС) косвенного контроля технологического оборудования, которая позволяет осуществлять мониторинг состояния технологических процессов без подключения к СЧПУ, схематично представленная на рисунке 1 [11].

Разработанная ИИС представляет собой многоуровневую структуру, включающую:

1. Первый уровень – датчики вибрации и тока, установленные на оборудовании для сбора данных о его работе.
2. Второй уровень – устройства сбора и передачи данных, передающие информацию на сервер.
3. Третий уровень – сервер, обрабатывающий и анализирующий данные, на основании которых формируются отчеты о работе оборудования и рекомендации для операторов.



Рисунок 1 – ИИС косвенного контроля состояния технологических систем

Для формирования отчетов о работе оборудования осуществляется анализа данных, собранных с помощью вышеуказанных датчиков, используются методы машинного обучения, такие как рекуррентные нейронные сети (RNN) с долговременной и кратковременной памятью (LSTM) и управляемые рекуррентные блоки (GRU) [12].

Кроме того, применение ИНС еще и для анализа отчетов о работе оборудования позволяет выявлять факты работы оборудования на холостом ходу для имитации работы, факты работы оборудования, имитирующей работу по управляющей программе; факты изменения режимов резания; фиксировать прерывания технологического процесса и повторение технологических переходов; анализировать ритмичность выпуска продукции на оборудовании и фактическую производительность каждого оператора; обнаруживать несоблюдения сменно-суточного задания; определять коэффициент загрузки оборудования; количество и номенклатуру изготовленных деталей.

Расчет общей эффективности оборудования

С использованием предложенной ИИС возможно рассчитать общую эффективность оборудования в автоматизированном режиме. В общем виде общая эффективность работы оборудования рассчитывается как произведение всех трех основных факторов: коэффициента доступности (A), коэффициента производительности (P) и коэффициента качества (Q) [13]:

$$OEE = A \cdot P \cdot Q. \quad (1)$$

Каждый из этих факторов отражает определенный аспект работы оборудования, и их комбинация позволяет получить комплексную оценку эффективности производственного процесса. Разработанная ИИС косвенного контроля технологического оборудования позволяет отслеживать и улучшать каждый из этих компонентов, что в конечном итоге приводит к повышению общего показателя ОЕЕ, так как ИИС косвенного контроля технологического оборудования не только собирает данные о работе оборудования, но и формирует отчеты, которые напрямую связаны с компонентами общей эффективности оборудования ОЕЕ. Эти отчеты предоставляют ценную информацию для анализа (рисунок 2) за различные периоды времени (сутки, неделя, месяц), которые содержат информацию о работе оборудования, включая время работы, простои, энергопотребление, вибрацию и другие параметры. Эти отчеты позволяют выявить признаки износа инструмента, неисправности оборудования и отклонения от заданных технологических параметров. Графическая часть отчета содержит информацию о темпах работы оборудования и отклонениях от заданного графика.

Анализ отчетов ИИС позволяет не только оценить текущее значение ОЕЕ, но и выявить области для улучшения, что приводит к значительному повышению эффективности производства, рассматриваемую далее подробно.

Отчёт 2023-08-01 – СПК1

Секунд всего	Секунд работы	Процент работы в сутки, %	Процент работы в рабочее время, %	Потребленная мощность, кВт*ч	Деталей	Инструментов	Период формирования
86400	69712	80,69	86,06	1706,19	92	0	0:00:00 – 23:59:59
3600	2969	82,47	82,47	76,17	5	0	0:00:00 – 1:00:00
3600	3052	84,78	84,78	78,31	5	0	1:00:00 – 2:00:00

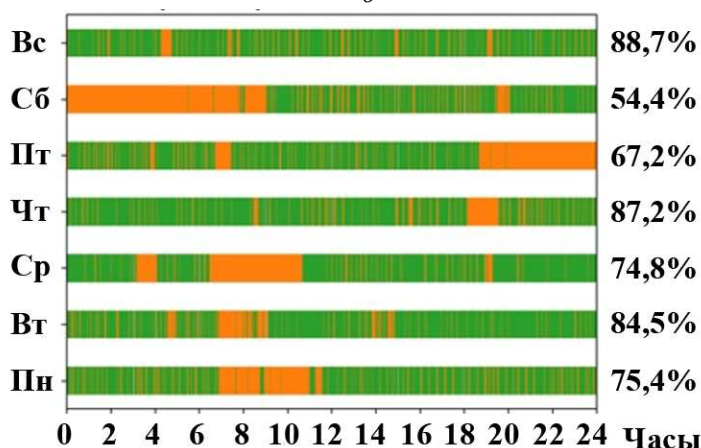
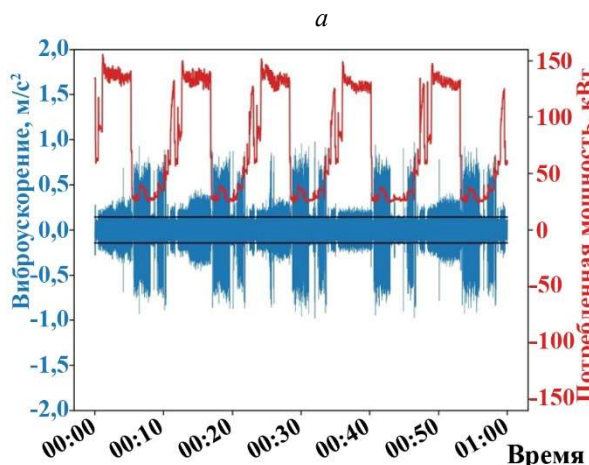
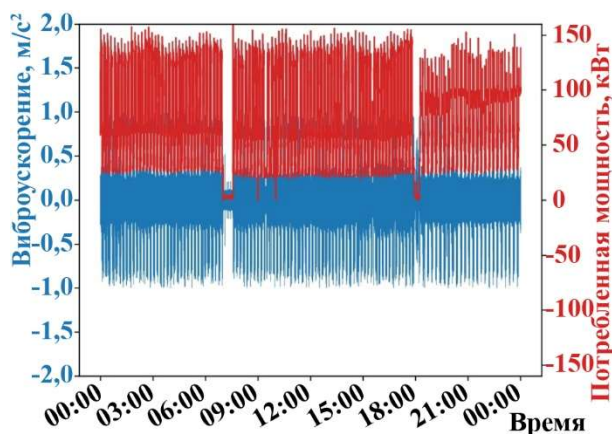


Рисунок 2 – Пример отчета о работе оборудования:

а – статистические данные; б – визуальная схема работы за сутки;

в – почасовая визуализация образов обработанных деталей;

г – фрагмент еженедельного отчета

Коэффициент доступности оборудования отражает процент времени, в течение которого оборудование фактически работает (операционное время, OT), по сравнению с планируемым производственным временем (PPT) [13]

$$A = OT / PPT. \quad (2)$$

Планируемое производственное время может быть определено как разница общего времени работы предприятия (POT) и времени плановых остановок (PSD)

$$PPT = POT - PSD. \quad (3)$$

Например, при работе предприятия в три смены по восемь часов общее время работы предприятия можно оценить как 24 часа (или 1440 минут, или 86400 секунд), на время плановых остановок можно отнести обед рабочих по 30 минут в каждую смену, т. е. 90 минут или 5400 секунд в сутки. Тогда планируемое производственное время составит 1350 минут или 81000 секунд в сутки.

Доступность учитывает потери на остановки (DTL), вызванные техническими неисправностями, переналадкой оборудования или другими организационными проблемами, из планируемого производственного времени:

$$OT = PPT - DTL. \quad (4)$$

С помощью ИИС у операторов станка есть возможность указать время начала и конца остановки оборудования и ее причину с помощью панели оператора ИИС. Для выбора причины простоя оператору необходимо нажать на соответствующую кнопку на экране панели оператора (рисунок 3, а) и причина простоя и время ее начала будут зафиксированы ИИС. После устранения причины простоя на панели оператора необходимо нажать кнопку

«ЗАВЕРШИТЬ ПРОСТОЙ» (рисунок 3, б) и время окончания простоя будет также зафиксировано ИИС.



Рисунок 3 – Пример интерфейса панели оператора ИИС:
а – окно причин простоя; б – окно простоя

Предложенная ИИС может оценить операционное время оборудования путем выделения части сигналов вибрации и потребляемого тока, соответствующего работе оборудования. Например, для сигнала вибрации назначается пороговый уровень виброускорения $a_{\text{порог}}$, превышение которого для каждой секунды записанного сигнала соответствует эксплуатации технологического оборудования по назначению. Таким образом, все значения виброускорения, превышающие пороговый уровень из всего множества записанных сигналов $\mathbf{A}$, $\forall a \in \mathbf{A}, a \geq a_{\text{порог}}$ соответствуют работе оборудования, а количество таких значений (мощность множества) позволяют определить операционное время:

$$OT = |\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}| \quad (5)$$

и коэффициент доступности оборудования

$$A = \frac{|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}|}{PPT} = \frac{|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}|}{POT - PSD}. \quad (6)$$

Для повышения коэффициента доступности оборудования ИИС помогает оптимизировать процессы переналадки оборудования, предоставляя данные о текущем состоянии инструмента, и снизить внеплановые простои оборудования, предоставляя данные о прогнозе состояния оборудования.

Коэффициент производительности оборудования отражает скорость работы оборудования по сравнению с его максимальной производительностью. Этот показатель учитывает потери, связанные с работой оборудования на пониженных скоростях или с перерывами в работе. Расчет коэффициента производительности можно осуществить по формуле

$$P = \frac{ICT \cdot TP}{OT} = \frac{ICT \cdot TP}{|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}|}, \quad (7)$$

где ICT – идеальное время цикла, т. е. время на изготовление одной детали;

TP – количество изготовленных деталей.

Идеальное время цикла определяется сменно-суточным заданием и вводится в ИИС мастером участка [14], а количество изготовленных деталей определяется ИИС в автоматическом режиме с помощью методов искусственного интеллекта (рисунок 4) [12].

В случае многономенклатурного производства, когда за отчетный период могут изготавливаться разные детали, коэффициент производительности будет рассчитываться следующим образом:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n ICT_i \cdot TP_i}{|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}|}, \quad (8)$$

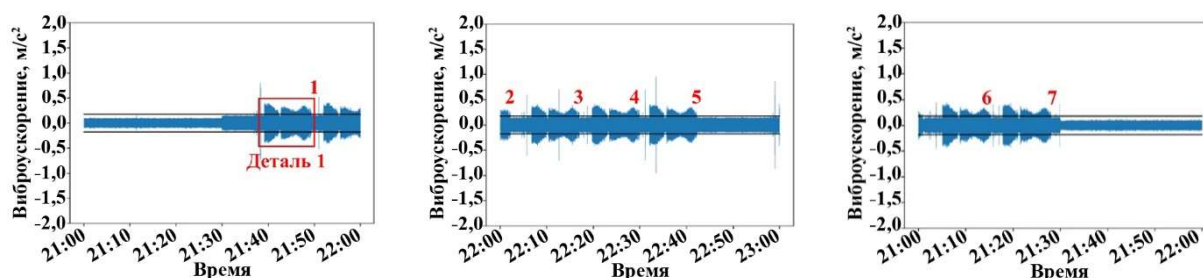
где n – количество номенклатур деталей;

ICT_i – идеальное время цикла детали i -й номенклатуры деталей;

TP_i – количество изготовленных деталей i -й номенклатуры деталей.

Наименование изделия	Код-инв.	Плановое время на об.	Плановое начало	Плановое окончание	Факт. начало	Факт. окончание	Факт. план-ов	Результат		Причина
деталь 1			16:00	17:30	16:00	17:30				
отсутствует заготовка			17:30	21:30	17:30	21:30				
Деталь 1	7	14	21:30	00:30	21:30	00:30	7			

а



б

Рисунок 4 – Пример контроля изготовления деталей с помощью ИИС:

а – фрагмент сменно-суточного задания;

б – сигнал вибрации оборудования за указанный период

ИИС способствует повышению коэффициента производительности оборудования посредством:

- оптимизации режимов работы за счет анализа данных о вибрации и электропотреблении, что позволяет избежать работы на неэффективных режимах и приводит к снижению идеального времени цикла;

- контроля ритмичности производства, выявляя отклонения от заданного темпа, что позволяет оперативно реагировать на сбои производственного процесса и минимизировать потери времени.

- автоматизации анализа больших объемов данных, что значительно ускоряет процесс принятия решений и повышает точность рекомендаций по оптимизации производительности.

Коэффициента качества продукции отражает выпуск годной продукции (GP), т. е. фактическое количество единиц годных деталей, произведенных оборудованием за операционное время, по отношению к общему количеству изготовленных деталей

$$Q = \frac{GP}{TP}. \quad (9)$$

Фактическое количество единиц годных деталей определяется цеховыми метрологами из отдела технического контроля и вводится в ИИС, а количество изготовленных деталей, как и в случае с производительностью, определяется ИИС в автоматическом режиме с помощью методов искусственного интеллекта.

В случае многономенклатурного производства

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n GP_i}{\sum_{i=1}^n TP_i}, \quad (10)$$

где n – количество номенклатур деталей;

GP_i – фактическое количество единиц годных деталей i -й номенклатуры деталей;

TP_i – количество изготовленных деталей i -й номенклатуры деталей.

Коэффициент качества учитывает потери, связанные с браком и необходимостью переделки продукции. ИИС в рамках методологии бережливого производства позволяет осуществлять:

1. Контроль технологической дисциплины. Позволяет выявлять отклонения от заданных режимов обработки, которые могут привести к браку при изготовлении детали.

2. Раннее выявление дефектов технологической системы. За счет анализа вибрационных сигналов позволяет выявить износ инструмента или неисправность оборудования, которые могут привести к производству бракованной продукции.

3. Автоматическую классификацию изготовленных деталей с использованием ИИС. Позволяет контролировать выполнение сменно-суточного задания и минимизировать потери от изготовления незапланированной продукции.

Учитывая вышеизложенное, разработанная ИИС может определять ОЕЕ по формуле

$$OEE = \frac{|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}|}{PPT} \cdot \frac{ICT \cdot TP}{|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}| \cdot TP} \cdot \frac{GP}{TP} = \frac{ICT \cdot GP}{PPT}, \quad (11)$$

или в условиях многономенклатурного производства

$$OEE = \frac{|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}|}{PPT} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n ICT_i \cdot TP_i}{|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}| \cdot \sum_{i=1}^n TP_i} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n GP_i}{\sum_{i=1}^n TP_i} = \frac{\sum_{i=1}^n ICT_i \cdot TP_i \cdot \sum_{i=1}^n GP_i}{PPT \cdot \sum_{i=1}^n TP_i}. \quad (12)$$

Повышение ОЕЕ напрямую влияет на экономическую эффективность производства. Увеличение коэффициента доступности оборудования позволяет увеличить объем выпускаемой продукции, что позволяет снизить затраты на единицу продукции за счет оптимизации режимов работы. Улучшение коэффициента качества позволяет снизить потери от брака и повысить удовлетворенность клиентов.

Заключение

Разработанная ИИС доказала свою эффективность в условиях реального производства. Использование ИИС позволяет не только повысить ОЕЕ, но и обеспечить технологическую независимость предприятий в условиях санкционного давления. В результате применения ИИС увеличился коэффициент доступности оборудования на 10,5 % за счет своевременного выявления и устранения неисправностей, повысился коэффициент производительности на 4,7 % за счет оптимизации режимов работы оборудования и улучшился коэффициент качества продукции на 28,5 % благодаря контролю технологической дисциплины и своевременной замене изношенного инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азарян, Д. К. Показатели эффективности технологического оборудования / Д. К. Азарян, В. М. Медунецкий // Приборостроение. – 2022. – № 5. – С. 350-356.
2. Кузнецов, А. Эффективность металлообрабатывающего оборудования и производственных систем. Часть 2. Общая эффективность металлообрабатывающего оборудования и производственных систем / А. Кузнецов, А. Каляшина // Станкоинструмент. – 2017. – № 2. – С. 56-64.

3. Оценка общей эффективности оборудования при поддержке принятия решений по техническому обслуживанию и ремонту / Ф. А. Акланов, Ю. А. Нургалеева, О. О. Смирнов [и др.] // Решетневские чтения. – 2014. – № 18. – С. 9-11.
4. Гришин, А. И. Оценка общей эффективности оборудования как основной инструмент контроля и повышения эффективности производства в системе ТРМ / А. И. Гришин // Стандарты и качество. – 2012. – № 8. – С. 95.
5. Аникеева, О. В. Обеспечение общей эффективности оборудования при производстве металлических профилей / О. В. Аникеева, Р. Ю. Шаповалов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2015. – № 4 (61). – С. 59-64.
6. Белов, Д. Б. Повышение эффективности использования оборудования на участке фрезеровки цеха металлоконструкций / Д. Б. Белов, А. А. Гореликов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 288-291.
7. Десяев, С. Мониторинг общей эффективности использования оборудования / С. Десяев // Молочная промышленность. – 2020. – № 4. – С. 20-21.
8. Янов, Е. С. О проблемах интеграции информационно-измерительных систем в условиях противодействия компьютерным атакам / Е. С. Янов // Электроника НТБ. – 2024. – № 6. – С. 60-63.
9. Датчик вибрации как основа системы мониторинга оборудования / Е. С. Янов, А. В. Анцев, М. С. Воротилин [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2024. – Т. 22, № 3. – С. 23-30.
10. Данные о потребляемой оборудованной мощности как дополнительный источник информации для информационно-измерительной системы / А. В. Анцев, Д. П. Барсуков, М. С. Воротилин [и др.] // Электроника НТБ. – 2024. – № 9. – С. 124-127.
11. New system for indirect tool monitoring in industrial systems and processes / E. S. Yanov, A. V. Antsev, M. S. Vorotilin, E. I. Minakov // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44, No. 6. – P. 868-870.
12. Янов, Е. С. Применение технологий машинного обучения и искусственного интеллекта для анализа технологических процессов / Е. С. Янов, А. В. Анцев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. – 2024. – № 3. – С. 33-40.
13. Рогаткин, А. Ю. Общая эффективность оборудования (ОЕЕ): в поиске зоны улучшений / А. Ю. Рогаткин // Методы менеджмента качества. – 2019. – № 11. – С. 18-21.
14. Янов, Е. С. Автоматизированный контроль технологической дисциплины современного машиностроительного производства / Е. С. Янов, А. В. Анцев // Вестник РГРТУ. – 2024. – № 88. – С. 86-95.

Анцев Александр Витальевич

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула
заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение»
300012, г. Тула, пр-т Ленина, 92
E-mail: a.antsev@yandex.ru

Каравдин Леонид Александрович

АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева», г. Тула
заместитель генерального директора по инфраструктуре
300004, г. Тула, ул. Щегловская засека, д. 33

Анцева Наталья Витальевна

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула
доцент кафедры «Вычислительная техника» 300012,
г. Тула, пр-т Ленина, 92
E-mail: n.anzeva@yandex.ru

Янов Евгений Сергеевич

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула
заместитель директора
300012, г. Тула, пр-т Ленина, 92
E-mail: dexaik@mail.ru

ANTSEV A.V., ANTSEVA N.V., KARAVDIN L.A., YANOV E.S.

ASSESSMENT OF OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS USING INDIRECT CONTROL SYSTEM OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Abstract. *The article discusses an approach to assessing the overall equipment effectiveness (OEE) using an information and measurement system (IMS) for indirect control of technological equipment. The aim of the study is to improve OEE by monitoring equipment condition based on the analysis of vibration signals and power consumption without the need to connect to a numerical control system (CNC). The architecture of the IMS is proposed, including vibration and current sensors, data acquisition devices, and a server for information processing using machine learning methods. Methods for calculating equipment availability, performance, and quality, as well as automated OEE determination, are described. The results of IMS implementation at machine-building enterprises are presented, showing an increase in equipment availability by 10.5 %, performance by 4.7 %, and product quality by 28.5 %. The system reduces downtime, minimizes defects, and lowers non-production costs, thereby enhancing the economic efficiency of production under import substitution and sanctions pressure.*

Keywords: *overall equipment effectiveness (OEE), information and measuring system, indirect control, process equipment, vibration signal, power consumption, technological discipline.*

BIBLIOGRAPHY

1. Azaryan, D. K. Pokazateli effektivnosti tekhnologicheskogo oborudovaniya / D. K. Azaryan, V. M. Medunetskii // *Priborostroenie*. – 2022. – № 5. – S. 350-356.
2. Kuznetsov, A. Effektivnost metallobrabatyvayushchego oborudovaniya i proizvodstvennykh sistem. Chast 2. Obshchaya effektivnost metallobrabatyvayushchego oborudovaniya i proizvodstvennykh sistem / A. Kuznetsov, A. Kalyashina // *Stankoinstrument*. – 2017. – № 2. – S. 56-64.
3. Otsenka obshchei effektivnosti oborudovaniya pri podderzhke prinyatiya reshenii po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu / F. A. Aklanov, Yu. A. Nurgaleeva, O. O. Smirnov [i dr.] // *Reshetnevskie chteniya*. – 2014. – № 18. – S. 9-11.
4. Grishin, A. I. Otsenka obshchei effektivnosti oborudovaniya kak osnovnoi instrument kontrolya i povysheniya effektivnosti proizvodstva v sisteme TRM / A. I. Grishin // *Standarty i kachestvo*. – 2012. – № 8. – S. 95.
5. Anikeeva, O. V. Obespechenie obshchei effektivnosti oborudovaniya pri proizvodstve metallicheskih profilei / O. V. Anikeeva, R. Yu. Shapovalov // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. – 2015. – № 4 (61). – S. 59-64.
6. Belov, D. B. Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya oborudovaniya na uchastke frezerovki tsekha metallokonstruktsii / D. B. Belov, A. A. Gorelikov // *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. – 2022. – № 4. – S. 288-291.
7. Desyaev, S. Monitoring obshchei effektivnosti ispolzovaniya oborudovaniya / S. Desyaev // *Molochnaya promyshlennost*. – 2020. – № 4. – S. 20-21.
8. Yanov, E. S. O problemakh integratsii informatsionno-izmeritelnykh sistem v usloviyakh protivodeistviya kompyuternym atakam / E. S. Yanov // *Elektronika NTB*. – 2024. – № 6. – S. 60-63.
9. Datchik vibratsii kak osnova sistemy monitoringa oborudovaniya / E. S. Yanov, A. V. Antsev, M. S. Vorotilin [i dr.] // *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy*. – 2024. – T. 22, № 3. – S. 23-30.
10. Dannye o potrebyaemoi oborudovanii moshchnosti kak dopolnitelnyi istochnik informatsii dlya informatsionno-izmeritelnoi sistemy / A. V. Antsev, D. P. Barsukov, M. S. Vorotilin [i dr.] // *Elektronika NTB*. – 2024. – № 9. – S. 124-127.
11. New system for indirect tool monitoring in industrial systems and processes / E. S. Yanov, A. V. Antsev, M. S. Vorotilin, E. I. Minakov // *Russian Engineering Research*. – 2024. – Vol. 44, No. 6. – P. 868-870.
12. Yanov, E. S. Primenenie tekhnologii mashinnogo obucheniya i iskusstvennogo intellekta dlya analiza tekhnologicheskikh protsessov / E. S. Yanov, A. V. Antsev // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region*. – 2024. – № 3. – S. 33-40.
13. Rogatkin, A. Yu. Obshchaya effektivnost oborudovaniya (OEE): v poiske zony uluchsheniya / A. Yu. Rogatkin // *Metody menedzhmenta kachestva*. – 2019. – № 11. – S. 18-21.
14. Yanov, E. S. Avtomatizirovannyi kontrol tekhnologicheskoi distsipliny sovremennogo mashinostroitel'nogo proizvodstva / E. S. Yanov, A. V. Antsev // *Vestnik RGRTU*. – 2024. – № 88. – S. 86-95.

Antsev Alexander Vitalyievich

Tula State University, Tula
Head of the Department of Mechanical Engineering and
Materials Science
300012, Tula, 92 Lenin Avenue
E-mail: a.antsev@yandex.ru

Antseva Natalia Vitalievna

Tula State University, Tula
Associate Professor of the Department of Computer
Engineering
300012, Tula, 92 Lenin Avenue
E-mail: n.anzeva@yandex.ru

Karavdin Leonid Alexandrovich

JSC «RPA «SPLAV» named after A.N. Ganichev», Tula
Deputy General Director for Infrastructure
300004, Tula, 33 Shcheglovsk aya Zaseka Street

Yanov Evgeny Sergeevich

Tula State University, Tula
Deputy Director
300012, Tula, 92 Lenin Avenue
E-mail: dexaik@mail.ru

© Анцев А.В., Анцева Н.В., Каравдин Л.А., Янов Е.С., 2026

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/fipptt>
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 20.04.2026 г.

Дата выхода в свет

Формат 70X108/16. Усл. печ. л. 16

Цена свободная. Тираж 1000 экз.

Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95